Análise experimental do efeito de desaceleração de CAO em dispositivos de conversão de energia das ondas

Tiago Manuel Murta Rosa de Sousa Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente:

Orientador:

Co-Orientador:

Vogal:

Outubro de 2010

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Prof. António Sarmento pela oportunidade concedida de trabalhar um projecto experimental numa área em crescimento como o é a Energia das Ondas. É minha opinião que o desenvolvimento desta dissertação enriqueceu a minha formação na medida em que tornou claras as dificuldades existentes na realização de ensaios experimentais.

Deixo também um agradecimento ao Engenheiro Miguel Lopes pela total disponibilidade que ofereceu no decorrer do projecto do modelo utilizado, assim como pelo material emprestado para a realização dos ensaios. Também pelo empréstimo do sensor Laser utilizado um obrigado à doutoranda Ana Margarida. Deixo ainda uma palavra para João Caetano, técnico do Laboratório de Hidráulica pela companhia e apoio prestados durante o tempo de ensaios.

O meu mais sincero agradecimento vai para Tiago Duarte, por todas as horas de discussão sobre o trabalho a ser desenvolvido, pela ajuda na montagem eléctrica e por todo o restante apoio dado. A disponibilidade a cem por cento demonstrada facilitou muito a realização desta dissertação. Dar também uma palavra a Tiago Kullberg Martins pelo empréstimo de peças do modelo por ele utilizado e pelo tempo perdido a ensinar-me o funcionamento do canal.

Gostaria ainda de enaltecer o grupo de amigos que se formou nestes últimos 5 anos. Orgulho-me de afirmar que aprendi, diverti e cresci com todos eles. Todas as discussões, relativas ou não à dissertação, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional e é meu desejo que o possam continuar a fazer por um longo período de tempo.

Finalmente, mas não menos importante, agradecer à minha família por sempre me apoiar e pressionar a fazer mais e melhor e pela oportunidade dada para a realização deste curso.

Resumo

O objectivo deste trabalho foi analisar o potencial da desaceleração da coluna de água oscilante (CAO) para extracção de energia das ondas. Procurou também estudar-se a influência que alterações no diâmetro interno da bóia superior do modelo têm sobre a pressão obtida.

Foi desenvolvido um modelo apropriado à criação de pressão pela desaceleração da CAO, baseado num aparelho já existente e em funcionamento, o *SparBuoy*, tendo as dimensões gerais sido obtidas deste. Para comparação com os resultados obtidos desenvolveu-se o modelo teórico em MatLab permitindo o cálculo da pressão da CAO, caudais e potências. Este modelo foi posteriormente utilizado para a estimativa à escala real dos resultados.

Verificou-se que a variação do diâmetro interno da bóia junto à base desta aumenta a pressão obtida para frequências e amplitudes de onda elevadas, ficando em aberto a possibilidade de combinação desta geometria com a geometria base utilizada. Esta última foi analisada em detalhe devido à obtenção dos melhores resultados de entre quatro geometrias testadas. Relativamente a esta geometria verificou-se que a melhor frequência de onda é 1 Hz, ainda que a frequência de ressonância do modelo estivesse mais próxima de 0.8 Hz, devido ao efeito mais acentuado da desaceleração da CAO para este caso. À escala do modelo os valores obtidos para o caudal e a potência foram muito reduzidos, motivando a estimativa destes valores para uma escala real, de forma a melhor se perceber qual a gama de potências que este efeito pode gerar.

A estimativa a uma escala superior foi feita através do modelo teórico, após comprovação que este aproximava com elevada precisão os resultados do modelo experimental. Os valores estimados para uma escala de 30:1 demonstraram que é possível obter potências entre 20 e 467 W para uma altura de onda de 3 metros e período de 10 segundos, tendo as aproximações sido efectuadas por defeito. Estima-se ainda que com o aumento das dimensões do aparelho, nomeadamente o seu comprimento e consequentemente profundidade, a potência extraída possa atingir as dezenas de kW.

Em conclusão final fica a dúvida sobre se a desaceleração da CAO pode ser utilizada individualmente para a geração de elevadas quantidades de energia. No entanto este efeito poderá talvez ser utilizado para a melhoria de outros dispositivos que utilizem diferentes equipamentos de extracção de energia.

Palavras-chave: Coluna de água oscilante, desaceleração, energia das ondas

Abstract

The goal of this work was to study the potential of the deceleration of the oscilatting water column (OWC) for wave energy extraction. It was also studied the influence of the internal diameter of the model's top buoy on the attain pressures.

An appropriate experimental model for the building of pressure by the deceleration of the OWC was developed, based on an existing device, the *SparBuoy*. The global dimensions were taken from that device. A theoretical model was developed in MatLab, allowing the calculation of the pressure in the OWC base, as well as the water flow and absorbed power. The model was validated against the experimental data and was used to estimate the results to a real scale at a later stage.

It was verified that changing the internal diameter of the buoy near the lower end increases the pressure for high wave frequencies and heights, enabling the possibility of combinations between this geometry and the base geometry used. This last one was analised in detail as it was found to provide the highest energy absorption from the four tested geometries. It was possible to check that the best wave frequency for this experimental model is 1.0 Hz, despite the ressonance frequency be at 0.8 Hz. This result results from the higher influence of the deceleration, for this frequency, when compared to other cases. The values for flow and power at the model scale were very small, but allow the extrapolation to the real scale.

The rating at a higher scale was calculated with the theoretical model, which showed to be very accurate when compared with the experimental results. At a 30:1 scale it may be possible to produce between 20 and 467 W for a 3 meter wave height and 10 seconds period. However it can be expected that increasing the device length, and therefore it depth, allow power outputs of tens of kW.

As a last conclusion, it remains the doubt whether the deceleration of the water column will be an efficient means to extract energy from the waves. Nevertheless this effect can be used to in other devices with different power take-offs to enhance energy extraction.

Key words: Oscillating water column, deceleration, wave energy, power

Índice

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Notação

Acrónimos

AWS	*ARQUIMEDES WAVE SWING*
CAO	COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
IST	INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
OWC	*OSCILLATING WATER COLUMN*
PTO	POWER TAKE-OFF
SSG	*SEAWAVE SLOT-CONE GENERATOR*

Lista de Variáveis

a	RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO NO RESERVATÓRIO A E NA CAO	[-]
A	AMPLITUDE DE ONDA	[m]
A_t	ÁREA DA LIGAÇÃO ENTRE OS RESERVATÓRIOS A E B	
f	FREQUÊNCIA	[*Hz*]
g	ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE	[m/s^2]
L	COMPRIMENTO DA ABERTURA NA CAO ATÉ À SUPERFÍCIE LIVRE DENTRO DOS RESERVATÓRIOS	[m]
p	PRESSÃO	[Pa]
p_{at}	PRESSÃO ATMOSFÉRICA	[Pa]
p_{x_t}	PRESSÃO TOTAL	[Pa]
p_x	PRESSÃO RELATIVA À HIDROSTÁTICA	[Pa]
p_{0_x}	PRESSÃO EM REPOUSO	[Pa]
$Q_{A\to B}$	CAUDAL ENTRE OS RESERVATÓRIOS A E B	[m^3/s]
$Q_{2\to A}$	CAUDAL ENTRE CAO E RESERVATÓRIO A	[m^3/s]
t	TEMPO	[s]
t_A	TEMPO DECORRIDO COM A VÁLVULA DE A ABERTA	[s]
V	VELOCIDADE	[m/s]
$V_{A\to B}$	VOLUME DE ÁGUA QUE ESCOA DO RESERVATÓRIO A PARA O B	[m^3]
$V_{2\to A}$	VOLUME DE ÁGUA QUE ESCOA DA CAO PARA O RESERVATÓRIO A	[m^3]
$\dot{W}$	POTÊNCIA	[W]
z	PROFUNDIDADE	[m]
z_{0_x}	COTA EM REPOUSO	[m]
ρ	DENSIDADE	[Kg/m^3]
ζ	DESLOCAMENTO	[m]
$\dot{\zeta}$	VELOCIDADE	[m/s]
$\ddot{\zeta}$	ACELERAÇÃO	[m/s^2]
ω	FREQUÊNCIA DE ONDA	[rad/s]
ΔP_{AB}	VARIAÇÃO DE PRESSÃO ENTRE OS RESERVATÓRIOS A E B	[Pa]

Capítulo 1

1 Introdução

O presente trabalho trata da avaliação do potencial de desenvolvimento de um novo conceito para a extracção de energia das ondas. O modelo desenvolvido associa conceitos utilizados noutras tecnologias já existentes, procurando no entanto explorar efeitos diferentes. A sua concepção estrutural baseia-se num aparelho, desenvolvido para operação em alto-mar, consistindo numa bóia à superfície ligada a uma massa adicional submersa por intermédio de um tubo oco, no qual água oscila livremente. As principais diferenças entre este conceito e a tradicional CAO são o método de utilização da coluna de água oscilante e o sistema de conversão de energia (*power take-off – PTO)*. Na coluna de água oscilante (CAO) tradicional o ar é comprimido na câmara pneumática da bóia accionando uma turbina (usualmente uma turbina Wells ou de impulso), sendo este efeito tanto mais intenso quanto maior a velocidade da coluna de água, enquanto no modelo desenvolvido no âmbito desta dissertação pretende-se obter uma oscilação de pressão associada às variações de aceleração da CAO. A diferença de pressão é acumulada em dois reservatórios (um para alta pressão e outro para baixa) de forma a ser possível accionar uma turbina hidraúlica unidireccional com o caudal entre estes.

Neste trabalho será analisado o potencial da desaceleração da coluna de água, não entrando nas dificuldades da construção de um aparelho comercial em detalhe. Serão ensaiadas várias amplitudes e frequências de onda para se tentar concluir qual o estado do mar mais favorável para a criação de maiores diferenças de pressão. É também objectivo desta dissertação determinar se alterações na geometria interior da bóia flutuante afectam a desaceleração da coluna de água. Este trabalho incide principalmente na componente experimental, embora se inclua uma comparação com resultados teóricos.

No capítulo 2 introduz-se o tema da energia das ondas, analisando-se o seu potencial energético, ecológico e económico para os próximos anos. É feita uma revisão das tecnologias existentes à data, apontando-se casos específicos de testes efectuados e de novos protótipos que demonstram viabilidade para comercialização.

O capítulo 3 faz uma apresentação da teoria que impulsionou o desenvolvimento desta tese e das expressões utilizadas. Será incluída uma breve demonstração dos resultados teóricos para a escala do modelo e para a escala real.

O capítulo 4 exibe as instalações onde os testes foram realizados, as várias peças constituintes do modelo utilizado, o seu objectivo no modelo e os problemas encontrados na concepção do modelo. Será apresentada toda a instrumentação utilizada e respectiva calibração, assim como o programa de aquisição de dados criado. Neste capítulo indicam-se também quais os ensaios realizados ao longo deste trabalho e a metodologia utilizada nos mesmos.

No capítulo 5 serão analisados os resultados experimentais obtidos.

O capítulo 6 consistirá nas conclusões retiradas deste trabalho e qual a óptica de futuro do conceito explorado com este modelo. Serão apresentadas as dificuldades que terão de ser resolvidas para futuros desenvolvimentos nesta área.

1.1 Objectivos

Nesta dissertação estuda-se, de forma preliminar, a possibilidade de desenvolver um sistema de aproveitamento de energia das ondas baseado no desenvolvimento de altas e baixas pressões, respectivamente associadas à desaceleração e aceleração de uma coluna de água vertical existente no interior de uma bóia com movimentos de arfagem. Para tal procedeu-se ao desenvolvimento de um modelo adequado a este estudo, que foi ensaiado no canal de ondas do Laboratório de Hidraúlica, do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, do Instituto Superior Técnico. O modelo fabricado baseou-se num modelo desenvolvido numa tese que decorreu simultaneamente, tendo sido utilizadas algumas peças desse mesmo modelo. O objectivo principal dos ensaios experimentais foi verificar quais as pressões atingidas devido à aceleração e desaceleração da coluna de água para vários estados de ondas. Foram medidas as pressões na coluna de água e nos reservatórios adjacentes para se perceber qual a influência que as válvulas utilizadas têm sobre as pressões máximas atingidas nos reservatórios de alta e baixa pressão.

Como objectivo secundário tentou explorar-se uma variação de geometria que reforçasse a aceleração e desaceleração de água. Esta geometria alternativa foi obtida por variação do diâmetro interno da bóia superior em duas zonas distintas.

O modelo foi dimensionado com o programa comercial de projecto mecânico SolidWorks e para a aquisição de dados criou-se um programa em LabView.

No decorrer deste trabalho desenvolveu-se um pequeno programa teórico em MatLab que permitiu a comparação das pressões obtidas experimentalmente e teoricamente. Através deste programa tentou demonstrar-se qual a potencialidade de um aparelho deste tipo à escala real e comparar os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.

Capítulo 2

2 Energia das Ondas

2.1 *Background* Histórico

Actualmente assiste-se a uma dependência energética forte dos combustíveis fósseis. Estes não possuem a capacidade de auto-renovação para suster a larga procura existente e deste modo a procura por fontes alternativas de energia é um assunto de extrema importância. Além da falta de estabilidade, o prejuízo ambiental provocado pela utilização destes combustíveis está a atingir limites insustentáveis gerando também uma vertente alarmante e de urgência na mudança das fontes energéticas. A crescente aposta em energias renováveis, que além de serem recursos praticamente ilimitados não provocam problemas ambientais, denota a vontade de mudança antes de se atingirem extremos críticos.

Os oceanos equivalem a 70% da superfície do planeta e o potencial destes revela-se enorme. Existem várias formas de aproveitamento dos oceanos para a conversão de energia: a energia associada ao gradiente térmico (OTEC), a energia associada ao gradiente salino, a energia das correntes oceânicas e de maré, a energia das marés e a energia das ondas, que nos interessa particularmente nesta tese. A energia das ondas, ainda que não directamente, tem origem na energia solar. Esta é a responsável pelas correntes de convecção na atmosfera, i.e., o vento, que por sua vez gera as ondas nos oceanos. A energia das ondas constituem a forma de energia renovável mais densa no planeta[1]. No entanto, os aparelhos existentes à data não dispõem ainda de condições para serem uma solução viável de fornecimento de energia, pois não são ainda suficientemente fiáveis e economicamente rentáveis. A previsão é que, num futuro relativamente próximo, este tipo de energia possa vir a contribuir significativamente para produção da energia que consumimos. Ao longo dos últimos 30 anos assistiu-se à pesquisa e lançamento de vários protótipos para absorção de energia das ondas, maioritariamente por parte de um pequeno grupo de países - Dinamarca, Irlanda, Portugal, Noruega, Suécia, Japão, Índia, Austrália e, principalmente, Reino Unido. Nos últimos anos, a pesquisa alastrou-se aos EUA, China e Brasil principalmente.

2.2 Potencial

2.2.1 Potencial Energético

Actualmente estima-se que as ondas contenham um potencial a nível global entre 2 e 3 TW [1,2,3], sendo que com as tecnologias existentes apenas cerca de 20% pode ser explorado. Estudos quantificam a energia armazenada nas ondas cerca de 15 a 20 vezes superior, por metro quadrado, que a obtida pelos dispositivos eólicos ou solares [1, 4, 5].

O potencial bruto disponível nas ondas das linhas costeiras dos países pioneiros no desenvolvimento desta energia dispõem é considerável (ver tabela 2.1), sendo um grande incentivo na procura de tecnologias de alto rendimento.

País	Potencial (GW)
Suécia	~ 1
Noruega	46
Dinamarca	~ 3,5
Irlanda	21,5
Portugal [6]	21
Reino Unido	120
Austrália [7]	146
China [8]	128,5
EUA [9]	240
Europa	320
Mundo	2000 a 3000

Tabela 2.1: Potencial energético, em GW, nos países mais relevantes no desenvolvimento da energia das ondas [10].

Neste enquadramento, a Suécia e a Dinamarca destacam-se pelo baixo potencial relativamente aos outros países, sendo o principal problema derivado do baixo recurso energético por metro de frente de onda, o que leva a falta de locais apropriados à exploração das ondas [10]. O envolvimento destes dois países deve-se à forte aposta em energias renováveis dos países nórdicos. Um local é considerado inapropriado quando as ondas não possuem energia suficiente para rentabilizar a instalação de um aparelho ou quando o estado do mar é demasiado variável ou inóspito. Para além destes factores pesam também a disponibilidade das ligações eléctricas, o tipo de fundos do mar e os possíveis conflitos com outras actividades, como as pescas, rotas marítimas ou até actividades militares. A evolução

da tecnologia associada a esta energia deixa em aberto a percentagem destes potenciais que pode ser eficientemente aproveitada, sendo estes valores teóricos. A potência *P* contida nas ondas, por metro de frente de onda, depende da sua amplitude (*H*) e do período das ondas (*T*) [3, 11], sendo por isso evidente a influência que o estado do mar possui na escolha dos locais. Para águas suficientemente profundas (tipicamente acima dos 50 m de profundidade) tem-se

$$P \approx \frac{1}{2} H^2 T \quad (\mathrm{kW/m}) \tag{2.1}$$

Ao longo dos anos, vários estudos permitiram cartografar esta potência em várias zonas do globo. O mapa da Figura 2.1 ilustra as zonas mais propícias à exploração da energia das ondas [12], estando o potencial nas linhas costeiras dos continentes apresentado na Figura 2.2, em kW/m [13].
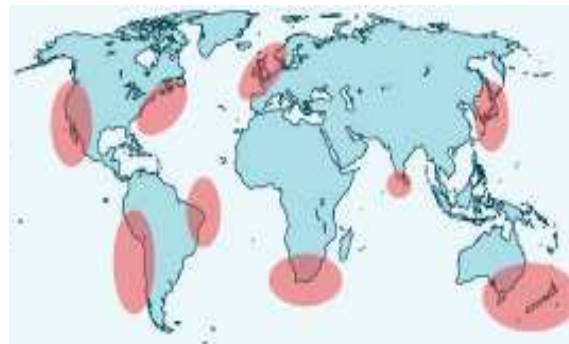
Figura 2.1: Zonas mais propícias à extracção de energia das ondas [12].

Note-se que o potencial mares interiores ou confinados não se encontra apresentado (nem é apresentado na Figura 2.2) dada a baixa densidade de energia nestas zonas. A exploração da energia das ondas no alto-mar é complexa por uma grande variedade de factores, sendo os principais a grande variabilidade de potência nas ondas[5], a dificuldade acrescida nas amarrações, a necessidade de aparelhos mais resistentes para enfrentar as intempéries (e consequentemente mais dispendiosos) e o maior investimento na ligação eléctrica a terra. O facto da quantidade de problemas a resolver ser menor junto à costa levou a que as pesquisas se focassem aí numa fase inicial, ainda que se pense que os aparelhos costeiros apenas possam absorver entre 25% a 50% do que um aparelho em alto-mar poderia absorver para a mesma onda [6]. Mesmo dentro dos aparelhos costeiros, os diferentes estados do mar levam a que seja difícil obter alta eficiência continuamente, ainda que o factor de carga da energia das ondas, que se espera poder atingir 30 a 45%, seja superior ao solar, que se estima entre 10 a 20%, ou ao eólico, entre 25 a 35% [14,15].
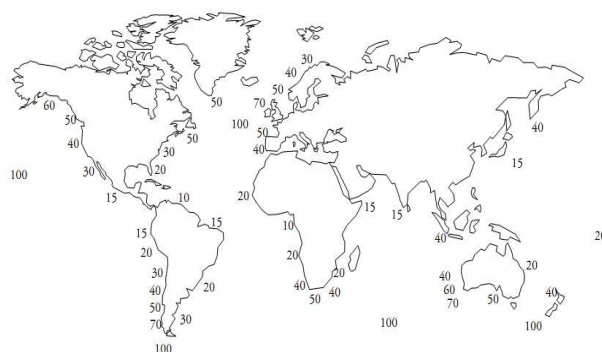
Figura 2.1: Valores representativos, em kW por metro de frente de onda, da potência das ondas para várias localizações [13]

2.2.2 Potencial Ambiental

Na Figura 2.3 comparam-se as emissões de carbono por ciclo de vida das diferentes tecnologias de energia existentes. Nesta análise consideram-se as emissões para a construção dos diferentes aparelhos e verifica-se a grande diferença entre as energias renováveis e os combustíveis fósseis.
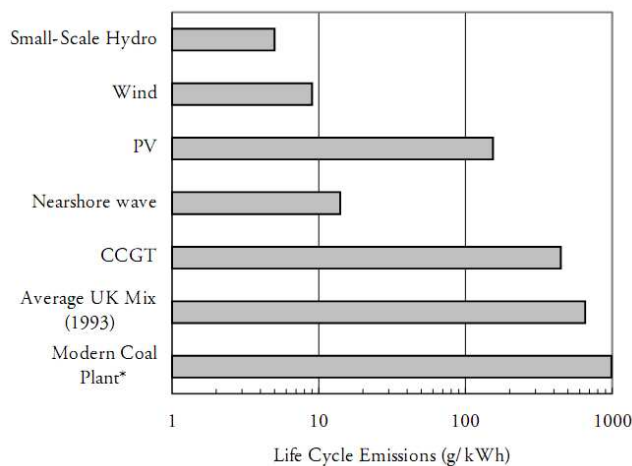
Figura 2.2: Comparação das emissões de ciclo de vida para os diferentes tipos de energia [13]

Como se observa da análise do gráfico, a energia das ondas, na qualidade de energia renovável, possui também o seu grande potencial relativamente ao ambiente. Presentemente estima-se que entre um a dois milhares de milhões de toneladas de CO_2 emitidos por ano possam ser evitados pela substituição de combustíveis fósseis pela exploração da energia das ondas em larga escala [16].

É também necessária uma análise relativamente a outros factores ambientais, tais como o impacte nas espécies marinhas, a poluição sonora e visual e até a influência nas linhas costeiras. Estes factores dividem-se em dois grupos tendo em conta à localização dos aparelhos de ondas usados: na costa ou *off-shore*. A presença de aparelhos na costa tem de ter em conta a destruição de paisagens cénicas e a influência sonora nas populações vizinhas, tendo menor influência na vida marinha. Estas implicações têm de ser consideradas na escolha de um local adequado. Por outro lado, no projecto de aparelhos *off-shore* é necessário perceber em que escala estes poderão afectar a vida marinha. Alguns estudos referem que a presença de conjuntos de aparelhos poderá servir de recife artificial [17], permitindo o desenvolvimento e proliferação de espécies. A morfologia costeira pode ser afectada se houver uma redução significativa da energia que é dissipada na zona de rebentação, situação que só com uma utilização muito intensiva da energia das ondas tem condições para ocorrer. No entanto são necessários mais dados sobre as emissões sonoras que possivelmente podem interferir com a orientação de algumas espécies [2, 10, 13, 18, 19, 20].

Em geral, a perspectiva é que a energia de ondas tenha um efeito muito positivo sobre o ambiente e à medida que o preço de mercado se for reduzindo e se tornar mais competitivo, estes baixos impactes ambientais tornar-se-ão um trunfo importante sobre outros tipos de energia poluentes, abrindo novas possibilidades para *mixes* energéticos mais renováveis e limpos.

2.2.3 Potencial Económico

Outro importante factor a avaliar no potencial destas tecnologias são as dificuldades económicas existentes.

Actualmente a fiabilidade das tecnologias desenvolvidas e os riscos de destruição envolvidos levam a que uma maior aposta na energia das ondas seja considerada dispendiosa. Somando a esta contrariedade estão as despesas na operação e manutenção dos aparelhos. Nos últimos anos tem existido a tentativa de incorporar sistemas de produção de energia das ondas em obras civis como quebra-mar, dividindo as despesas de ambos os projectos e simultaneamente partilhando as zonas de manutenção[17]. Contudo em vários casos constata-se que o acréscimo de despesa devido às remodelações necessárias dos projectos é demasiado elevado para ser viável na maioria dos casos.

Ultrapassando as dificuldades atrás descritas existirá ainda um grande obstáculo ao desenvolvimento das tecnologias: o preço de produção da energia. Os elevados preços de produção, relativamente aos preços praticados pela energia fóssil e eólica, serão potenciados principalmente pelo custo de operação e manutenção dos aparelhos, tendo ainda as amarrações uma fatia importante nestas despesas[2, 10, 18]. No entanto, as previsões dos preços

que se poderão praticar são promissoras. Em várias zonas dos EUA crê-se poder atingir-se uma tarifa entre os $0,09 e os $0,11/kWh [9] conseguindo melhores preços de venda que os obtidos pela energia solar ($0,20 a $0,30/kWh), [21]) mas ainda longe dos praticados pela energia eólica ($0,05/kWh, [21, 22]) e fóssil ($0,03/kWh, [1, 20]). Na Europa, o preço desta energia - 0,08 EUR/kWh - rondará também o dobro do preço corrente existente para os *mixes* praticados - 0,04 EUR/kWh [10]. Espera-se que com o desenvolvimento das tecnologias o preço de produção se reduza e se torne directamente competitivo com o obtido pela energia eólica [15], isto é, cerca de $0,04/kWh [1, 20] (0,065 €/kWh em Portugal, devido à menor intensidade do vento). Na Tabela 2.2 pode observar-se uma estimativa e comparação dos preços que poderão ser praticados quando as tecnologias se tornarem mais consistentes.

Energy Source	Cost as Primary Source (100 MW)	Cost as Secondary Source (1 MW)
Photovoltaic (Solar)	10-15	25-50
Diesel	n/a	12-100
Wind	5-6	10
Fossil Fuel	3-5	n/a
Wave	3-4	7-10

Tabela 2.2: Comparação do preço de produção das diferentes energias[1]

Contudo, uma vez que as tecnologias são recentes e com pouca comprovação torna-se complicado encontrar o financiamento para a criação de energia das ondas. Este factor económico leva a que a maior parte dos investimentos nesta nova energia renovável sejam derivados de financiamentos dos governos.

2.3 Tecnologias existentes e líderes

As tecnologias existentes para a absorção de energia das ondas podem ser catalogadas de várias formas, sendo as mais comuns por localização ou método de funcionamento. Neste trabalho opta-se por agrupar os aparelhos da segunda forma, existindo assim três grandes áreas: Coluna de Água Oscilante, Corpos Oscilantes e Galgamento.

2.3.1 Coluna de Água Oscilante

Os aparelhos do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC – *Oscillating Water Column*) foram dos primeiros a serem desenvolvidos, sendo apelidados várias vezes de aparelhos de primeira geração. O princípio destes dispositivos consiste na existência de uma câmara pneumática, fixa ou flutuante, à qual a onda acede pelo fundo ou por uma abertura lateral, comprimindo e expandindo alternadamente o ar contido na câmara e promovendo um fluxo de ar para e de a atmosfera exterior, através duma conduta onde se encontra uma turbina de fluxo reversível.
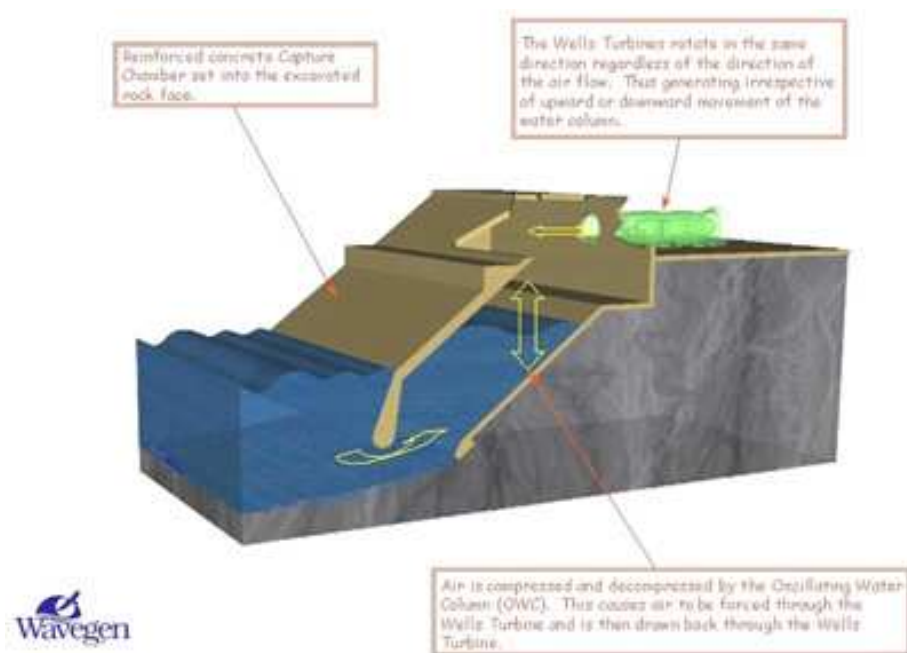
Figura 2.3: Esquema de funcionamento típico de OWC costeiro.

Estes aparelhos podem dividir-se em fixos e flutuantes, sendo que os fixos existem tanto isolados na costa ou perto da costa, como em quebra-mar. A inclusão de OWC em quebra-mar pode tornar os custos de construção mais razoáveis uma vez que os pode dividir com a construção do quebra-mar em si, além de permitir a existência de áreas de operação e manutenção comuns a ambos. Vários protótipos foram lançados e muitos encontram-se em funcionamento. De entre as centrais de coluna de água oscilante destacam-se: *Central Piloto Europeia da ilha do Pico* - Pico (Açores, 1999, [13, 23]) com uma potência de 400 kW [10]; *Limpet OWC* – Ilha de Islay (Escócia, 2000, [10,13,18,23]) e *Energetech OWC* – Port Kembla (Austrália, 2006, [9,10,13,23]) ambas com 500 kW de potência; *OSPREY* – Dounreay (Escócia, 1996, [13,23]) para 2 MW (dispositivo já fora de funcionamento); várias outras espalhadas pelo mundo – Toftestallen (Noruega, 1985); Sakata (Japão, 1990); Vizhinjam (Índia, 1990), etc [13,23].
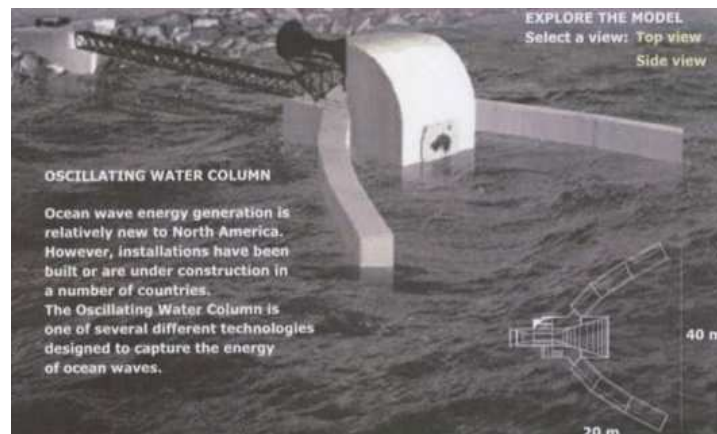
Figura 2.4: *Energetech OWC*, Port Kembla.

Na categoria das centrais de coluna de água oscilante flutuantes também existe já uma grande diversidade de aparelhos, dos quais o *Mighty Whale* [9,10], o *Backward Bent Duct Buoy* (BBDB) e o *Spar Buoy* são os mais reconhecidos. O *Mighty Whale* é uma adaptação dos dispositivos fixos possuindo três câmaras, cada uma associada a uma turbina Wells. No BBDB a grande diferença reside na forma da coluna de água oscilante, que passa a ser em forma de L, com parte mais longa horizontal e alinhada com a direcção de propagação das ondas e a abertura, vertical, na parte final do L, apontando para jusante. O comprimento do L é dimensionado para que se atinja a ressonância entre o movimento na câmara e o da coluna de água oscilante. Este modelo foi testado com sucesso no Japão e na China, e recentemente também na Irlanda (Galway Bay, 2006). O *Spar Buoy* é um OWC simples formado por um cilindro vertical longo, dimensionado para que se atinja a ressonância da coluna de água, tendo no topo uma turbina a ar. Uma das vantagens destes aparelhos flutuantes é a fixação, sendo ancorados com um elevado grau de liberdade ao fundo do oceano. Por oposição existe o *Orecon*, que é constituído por várias colunas de diferentes comprimentos e ancorado por cabos sob tensão ao fundo do mar. Os diferentes tamanhos permitem obter ressonância para vários estados do mar e várias frequências de onda [23].
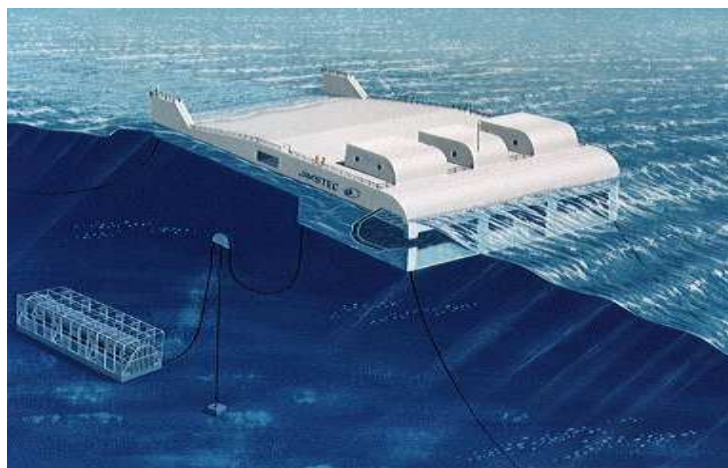
Figura 2.5: Representação do *Mighty Whale.*

2.3.2 Corpos Oscilantes

Os Corpos Oscilantes começaram a ser estudados simultaneamente com os dispositivos de OWC, mas apenas recentemente tiveram um desenvolvimento significativo em termos de protótipos testados no mar. Podemos dividir esta categoria em equipamentos flutuantes e submersos, sendo que vários diferem no tipo de movimento a partir do qual absorvem energia.

Na variante de equipamentos flutuantes os mais conhecidos, por terem atingido a fase de protótipo, são o *WaveBob* (Galway Bay, Irlanda, 2009, [23]), o *AquaBuoy* (Makah Bay, Washington, 2005, [9,23]), o *PowerBuoy* (Atlantic City, New Jersey, 2005 [9,14] e Santoña, Espanha, 2008, [23]) e o *Pelamis* (Portugal e Escócia, 2006, [9,10,13,16,23]), existindo ainda muitos outros como o *IPS Buoy*, o *Pendulor* [10,13]*, a McCabe Wave Pump* (Kilbaha, Irlanda, 1996, [9,10,13])*, o SDE* (Jaffa, Tel Aviv, 2008, [10,24])*, o PS Frog, o Searev, o Anaconda, o Pato de Salter o, Aegir Dynamo*, etc. A característica comum de todos estes dispositivos é o facto de todos possuírem partes constituintes da geometria em movimento por acção directa da água do mar, aumentando o desgaste do aparelho. Alguns deles partilham também o método de extracção de energia através de turbinas hidraúlicas. A ideia geral é pressurizar um líquido com a acção das oscilações das ondas e fazê-lo atravessar motores hidráulicos ou turbinas hidráulicas para gerar energia. Alguns dispositivos utilizam o movimento relativo entre dois corpos (um com baixa frequência de ressonância e o outro com alta) para criar a sobrepressão (*AquaBuoy, PowerBuoy, WaveBob)*, enquanto outros recorrem à oscilação de um pêndulo apenas (*Pendulor, Searev, PS Frog*). Estes, assim como o Pato de *Salter, McCabe Wave Pump* e o *Pelamis*, utilizam o movimento de rotação entre as diferentes peças constituintes do aparelho para pressurizar o líquido. O *SDE* consiste no aproveitamento do movimento das ondas junto a um quebra-mar, utilizando várias pás para captar as oscilações e comprimir o líquido. Os responsáveis por esta tecnologia afirmam conseguir um preço de mercado de $0,02/kWh [24]. O *Anaconda* é um projecto em desenvolvimento que utiliza as diferenças de pressão causadas pela deformação do seu corpo de borracha para formar uma pressão elevada numa das extremidades, extraindo energia através de turbinas hidráulicas pela passagem do fluido de dentro do corpo para fora [25]. Embora esta tecnologia não possua efectivamente um corpo em movimento mas sim em deformação foi incluída nesta categoria. Finalmente, o *Aegir Dynamo* destingue-se de todos os outros atrás referidos devido ao sistema directo de produção de energia, que transforma o movimento linear da bóia em movimento rotacional no gerador, aproveitando tanto o movimento ascendente como o descendente para fazer o gerador rodar na mesma direcção. O gerador usado neste aparelho é do mesmo tipo dos geradores usados pelas turbinas eólicas, os geradores magnéticos ou de íman permanente [11, 26].

(a) (b)
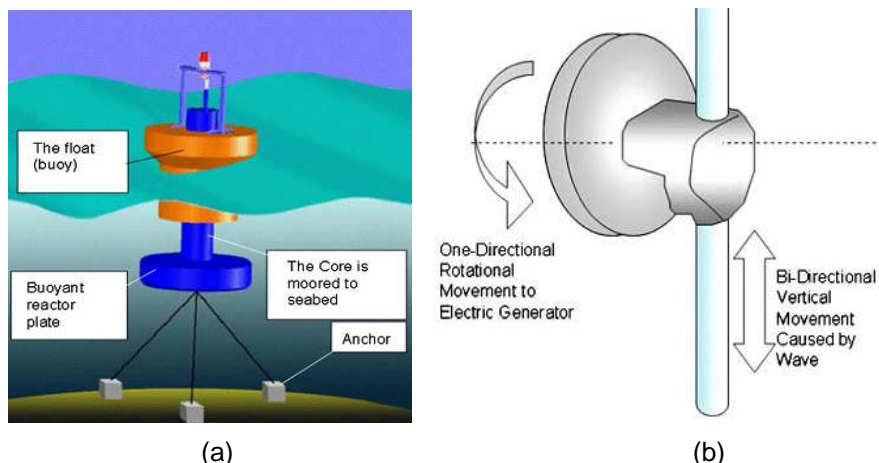
Figura 2.6: *Aegir Dynamo*. (a) Esquema do protótipo. (b) Conversor de movimento de translacção para movimento de rotação. [11]

Por outro lado existem ainda os equipamentos com ligação ao fundo do oceano e totalmente submersos. Destes destacam-se o *Arquimedes Wave Swing* (Portugal, 2004, [9,13,23]), *Oyster* [18,23], *WaveRoller* (Peniche, Portugal, 2008, [12,23]) e *CETO* (Garden Island, Austrália, 2010, [3,20]). Estes últimos três situam-se normalmente em águas pouco profundas (até 20 metros) e bombeiam água para uma turbina hidraúlica em terra. O *CETO* possuí a vantagem única de também produzir água potável através de um processo de osmose inversa e deste modo conseguir controlar a potência gerada através da percentagem de potência/água desejada [27, 28]. O *AWS* utiliza directamente um gerador eléctrico linear para converter o movimento do flutuador em relação à base.
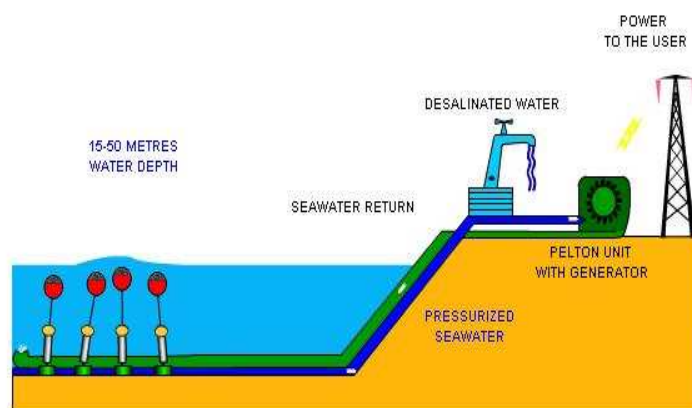
Figura 2.7: Esquema de funcionamento global da tecnologia *CETO*.

2.3.3 Galgamento

A última categoria refere-se aos dispositivos de galgamento. Estes são concebidos de forma a que as ondas galguem as paredes, frequentemente com a forma de uma rampa, de um reservatório sobrelevado. A água acumulada no reservatório flui de novo para o oceano, por gravidade, através de turbinas hidráulicas de baixa queda. Os dispositivos de galgamento podem ser flutuantes ou fixos na costa e por vezes utilizam um colector de ondas para que estas convirjam e aumentem a sua altura. Como exemplos tem-se os flutuantes *WaveDragon* (Nissum Bredning, Denmark, 2003, [9,10,23]) e o *Floating Wave Power Vessel* (Mu Mess, Shetland, 2002, [10]), e, como fixos, o *Tapchan* (Toftestallen, Noruega, 1985, [10,13,23]) e o *Seawave Slot-Cone Generator* (SSG) [23], sendo que o SSG é concebido especialmente para quebra-mares, embora também possua uma adaptação para *off-shore* [4]. No caso dos dispositivos fixos é necessário ter em conta a maré.

Figura 2.8: Fotografia de *Wave Dragon* em funcionamento na Dinamarca.

A Figura 2.10 apresenta as várias das tecnologias discutidas, agrupando-as de acordo com os mesmos critérios que a utilizada na descrição anterior, e resume a categorização dos diferentes aparelhos comentados.
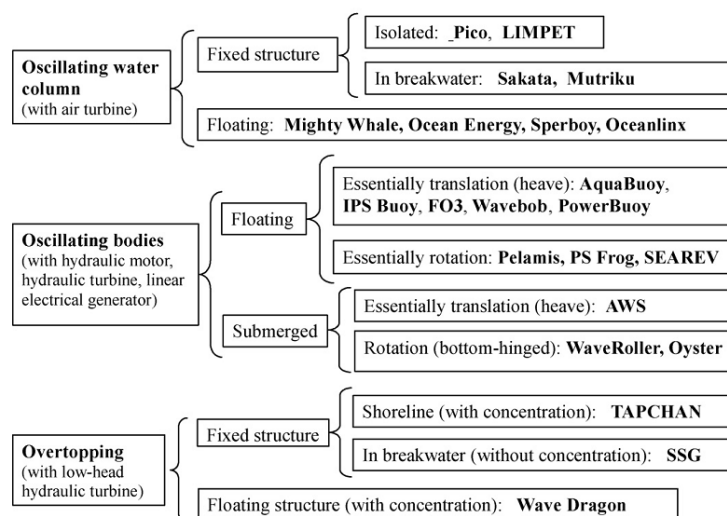
Figura 2.9: Quadro de resumo da classificação de várias tecnologias de conversão de energia das ondas[29]

Capítulo 3

3 Fundamentos Teóricos

A teoria linear das ondas de superfície é a base para este projecto. No entanto, ao invés de utilizar o movimento relativo entre a coluna de água e o aparelho, o dispositivo em estudo focar-se-á nas diferenças de pressão que é possível obter.

Neste dispositivo, a extremidade inferior de um uma coluna de água vertical é fechada com o objectivo de fazer oscilar a pressão na base da coluna, produzida pela aceleração/ desaceleração da água contida na coluna, que oscila devido aos esforços da onda sobre a bóia à qual está acoplada a coluna. Para que ao aumento de pressão resultante da alteração da aceleração da coluna de água se possa somar a componente hidrostática, a coluna de água encontra-se aberta para o exterior na parte superior, junto à bóia de superfície que assegura a flutuabilidade do conjunto. Na base inferior da coluna há dois reservatórios, um de alta pressão (A) e outro para baixa pressão (B), que estão em contacto com a coluna através de válvulas de não-retorno. A Figura 3.1 ilustra dispositivo descrito atrás. A concepção deste dispositivo é da autoria do orientador desta tese.
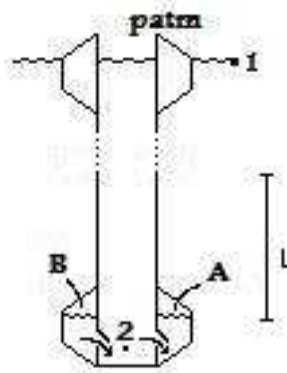
Figura 3.1: Esquema do dispositivo em estudo

Os dois reservatórios estão ligados entre si, permitindo passagem de fluído do de alta pressão para o de baixa através de uma turbina hidráulica.

A desaceleração da coluna de água no fundo do aparelho ocorre devido a dois fenómenos. Por um lado tem-se os momentos de mudança de sentido do aparelho em que se criam velocidades relativas com a CAO negativas. Por outro lado tem-se a entrada/saída de água da coluna de/para o exterior. Quando o aparelho sobe, a coluna de água sobe solidária com este. Como a passagem da onda é um pouco mais rápida que o movimento do aparelho

(o aparelho tem atraso relativamente à onda) ocorrem ocasiões em que a altura da coluna de água é superior à da superfície livre, levando a que se produza um movimento de saída de água pela abertura do tubo. Esse movimento é contrário ao movimento ascendente do aparelho e da zona inferior da coluna de água, constringindo este último e levando a um aumento de pressão na base da CAO.

Ambas as situações podem ser visualizadas na Figura 3.2.
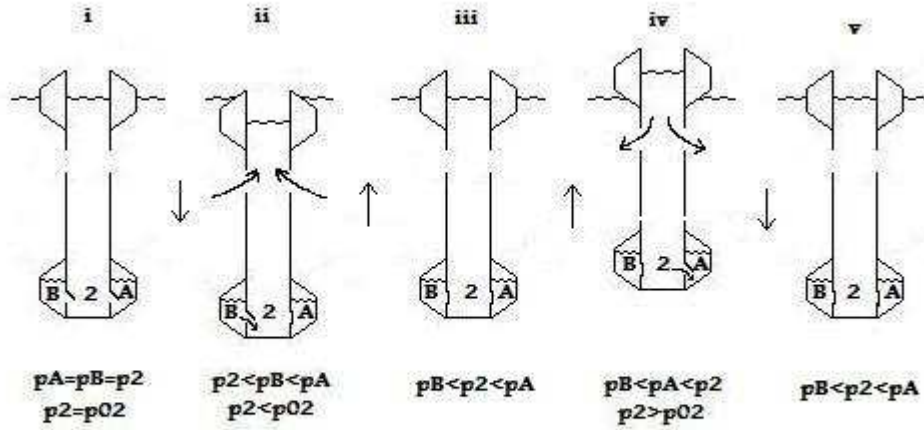
Figura 3.2: Esquema de funcionamento do aparelho. (i) repouso, equílibrio entre os reservatórios. (ii) movimento descendente, entrada de água na CAO. (iii) e (v) zonas de movimento ascendente e descendente com ambas as válvulas fechadas. (iv) movimente ascendente, saída de água da CAO.

A aceleração e desaceleração da coluna de água pode ser calculada através da equação de Bernoulli para regime estacionário, desde que se desprezem os efeitos viscosos. Como se pode ver na Figura 3.1 é possível relacionar um ponto na superfície livre exterior, 1, com um ponto na base da coluna de água, 2, relação obtendo-se através da equação de Bernoulli,

$$\frac{1}{g}\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} dl + (\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z)_2 - (\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z)_1 = 0 \quad (3.1)$$

O termo de aceleração está incluído nesta equação, uma vez que não é desprezável. As cotas dos pontos 1 e 2, z_1 e z_2, podem ser expressas em termos dos seus valores médios, z_{0_1}e z_{0_2} através de

$$\begin{cases} z_1 = z_{0_1} + \zeta(t) \\ z_2 = z_{0_2} + \zeta(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

em que $\zeta(t)$ é o deslocamento vertical, pelo que a velocidade e aceleração em 2 são expressas de acordo com

$$V_2 = \frac{dz_2}{dt} = \dot{\zeta}_2(t)$$
$$\frac{\partial V_2}{\partial t} = \ddot{\zeta}_2(t) \quad (3.3)$$

Assumindo agora que a velocidade e aceleração da superfície livre são desprezáveis face ao movimento do aparelho, a equação 1 permite obter

$$\frac{p_{0_2}}{\rho g} = \left[\frac{p_{at}}{\rho g} + \left(z_{0_1} - z_{0_2}\right)\right] + (\zeta_1 - \zeta_2) + \frac{1}{g}\ddot{\zeta}_2 \qquad (3.4)$$

Podem distinguir-se claramente três termos distintos nesta expressão. O primeiro corresponde à pressão hidrostática média, o segundo à variação de pressão hidrostática induzida pela diferença de cotas entre a superfície livre e a base da coluna de água e o terceiro à aceleração da coluna de água.

O parâmetro *L* que aparece no termo de desaceleração designa o comprimento entre a abertura do modelo junto à bóia superior e a superfície livre do fluído dentro dos reservatórios e p_{0_2} denomina a pressão total em 2.

Uma vez que para o caso em estudo interessam as variações de pressão relativamente ao seu valor médio, iremos trabalhar com a pressão total em 2 relativamente ao seu valor médio, ficando,

$$\frac{p_{0_2}}{\rho g} = (\zeta_1 - \zeta_2) + \frac{1}{g}\ddot{\zeta}_2 L \qquad (3.5)$$

Pode agora relacionar-se o deslocamento vertical à superfície livre ζ_1 com as características das ondas

$$\zeta_1 = A.e^{i\omega t} \qquad (3.6)$$

Em que *A* é a amplitude complexa da onda e ω a sua frequência em radianos por segundo. Associando a equação 3.6 com a 3.5 e considerando apenas as amplitudes complexas tem-se

$$\frac{p_{0_2}}{\rho g} = \left((A_1 - \xi_2) - \xi_2 \frac{\omega^2 L}{g}\right) \qquad (3.7)$$

De notar que o termo de variação de pressão hidrostática,$(A_1 - \xi_2)$, se refere às alterações da imersão da coluna de água. Como se explicará mais à frente o facto da variação desta imersão ser pequena leva a que este termo seja muito inferior quando comparado ao termo dinâmico.

As expressões atrás referenciadas permitem calcular qual a pressão da coluna de água no fundo do modelo.

Para se saber qual o diferencial de pressão entre as duas câmaras é necessário estimar a pressão de ambas relativamente à pressão de referência. Um valor razoável de partida é $a = \frac{p_A}{p_2} = 0.8$, em que a p_A é a pressão na câmara de alta pressão. Este valor depende da área

e forma da ligação dos reservatórios à CAO. Estimando p_A e p_B e sabendo o caudal de um reservatório para o outro pode calcular-se a potência debitada pelo PTO

$$\dot{W} = Q_{A\to B}.\Delta P_{AB} \tag{3.8}$$

Falta ainda especificar o tempo de abertura das válvulas para que a partir da velocidade do escoamento se possam obter os volumes de água movidos. Se se considerar que ao se atingir a pressão máxima no reservatório a válvula fecha pode relacionar-se o tempo das válvulas abertas com a pressão a montante e jusante delas. Defina-se t_A o tempo em que existe entrada de água no reservatório, isto é, o tempo até se atingir $p_{A_{max}}$. Tem-se então

$$\frac{p_{A_{max}}}{\rho g} = \left((A_1 - A_2) - A_2 \frac{\omega^2 L}{g}\right)\cos(\omega\, t_A) \tag{3.9}$$

Note-se que a expressão 3.9 apenas contabiliza as amplitudes reais em vez das complexas. Esta aproximação é feita considerando que a superfície livre tem uma variação diminuta fora do dispositivo.

Dividindo a expressão 3.9 pela expressão deduzida anteriormente para a pressão máxima em 2 obtém-se

$$a = cos(\omega\, t_A) \tag{3.10}$$

Pelo que t_A é dado por

$$t_A = \frac{\cos^{-1}(a)}{\omega} \tag{3.11}$$

O tempo de abertura das válvulas depende então da frequência da onda incidente e do coeficiente de relação entre as pressões a jusante e montante das válvulas, que por sua vez depende da área da ligação e novamente da frequência da onda.

Pode ainda relacionar-se o caudal que entra no reservatório A com o caudal que se escoa deste para o reservatório B. Para que a pressão ganha com a entrada de água seja totalmente aproveitada tem-se que o volume de água que entra no reservatório A é igual ao volume de água que se escoa numa oscilação de A para B. Relacionando estes volumes com o tempo disponível para cada escoamento tem-se

$$\begin{cases} Q_{A\to B} = \frac{V_{A\to B}}{t} \\ Q_{2\to A} = \frac{V_{2\to A}}{t_A} \end{cases} \tag{3.12}$$

Em que t designa o tempo de uma oscilação completa e pode ser relacionado com a frequência da onda por

$$t = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \tag{3.13}$$

Obtém-se finalmente

$$Q_{A \to B} = \frac{Q_{2 \to A}.t_A.\omega}{2\pi} = \frac{Q_{2 \to A}.\cos^{-1}(a)}{2\pi} \tag{3.14}$$

3.1 Aproximações consideradas

À partida para a concepção deste modelo existem problemas de difícil resolução que se tentou contornar. O facto da escala ser pequena afectou directamente os equipamentos que se poderiam utilizar e condicionou fortemente a concepção do modelo. As baixas pressões envolvidas agravam o problema. Estes dois parâmetros em conjunto forçaram a aproximação do cálculo do caudal que num modelo de maior escala poderia ter sido medido por instrumentação. Condicionaram também o diâmetro dos furos de ligação entre as três zonas de pressão distinta (a base da coluna de água, o reservatório de alta pressão e o de baixa pressão).

O primeiro problema a lidar foi a medição do caudal entre reservatórios. As pequenas dimensões e pressões esperadas tornaram a instrumentação desta grandeza impossível, pelo que os valores obtidos foram calculados a partir das pressões medidas. Com estas e utilizando a equação de Bernoulli estima-se a velocidade do escoamento entre os reservatórios. No entanto esta aproximação implica desprezar-se o termo não estacionário do escoamento nos reservatórios. É um facto que a entrada e saída de água nas câmaras gera movimento na água no seu interior existindo então uma componente de pressão dinâmica não contabilizada. Para atenuar estes erros de aproximação dimensionaram-se os reservatórios com uma área para a superfície livre superior à necessária, de modo a que os pequenos caudais movidos não alterassem significativamente o nível desta. Pode assim utilizar-se a equação de Bernoulli entre um ponto afastado da ligação, com velocidade desprezável, e um ponto no outro reservatório, imediatamente à saída da ligação, e obter-se a velocidade do escoamento através do furo.

Capítulo 4

4 Instalação Experimental

4.1 O Canal de Ondas

Os ensaios referentes a esta dissertação foram conduzidos nas instalações do Laboratório de Hidraúlica do Instituto Superior Técnico. Estas instalações consistem num canal de 1m altura por 0,70m de largura e 20m de comprimento, com capacidade de geração de ondas. O nível de água médio recomendado e utilizado foi de 0,5m. Para a adaptação do modelo e instrumentação no canal recorreu-se a uma plataforma no topo superior do canal, com ligação ao fundo deste por intermédio de um varão de aço inoxidável. Esta plataforma serviu também para o auxílio da instalação dos sensores utilizados.

Figura 4.1: Canal de Ondas do laboratório de hidraúlica do IST. (1) Plataforma de apoio.

4.2 O Modelo

Este modelo foi concebido especificamente para esta experiência, sendo que as medidas gerais seguem as já existentes num protótipo de um modelo similar. Algumas peças do modelo foram aproveitadas de um outro modelo fabricado no âmbito da tese de mestrado de Tiago Kullberg Martins, que disponibilizou o uso dessas mesmas peças na construção do modelo utilizado para a realização da presente dissertação.

(a) (b)
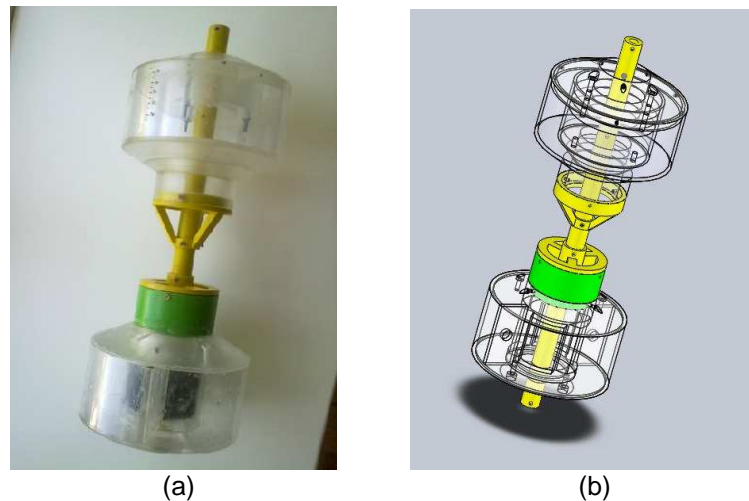
Figura 410.2: Modelo utilizado na dissertação. (a) real. (b) projecto.

O modelo consiste numa bóia superior para gerar flutuabilidade no modelo, e portanto puder aproveitar as oscilações das ondas, ligada a uma massa submersa por meio de um tubo aberto. A massa submersa será composta de dois reservatórios distintos e divididos que irão ter variações de quantidade de fluido no seu interior. Ambos os reservatórios encontram-se também ligados à CAO sendo o movimento da água restringido por válvulas em ambos os reservatórios. O tubo de ligação entre a bóia e a massa é aberto de forma a permitir a interacção da água da CAO com a água exterior.

4.2.1 Peças referentes ao outro modelo

As peças utilizadas do modelo já existente não serão aqui referidas encontrando-se em anexo uma breve descrição de cada uma delas e sua função, acompanhada de imagens.

4.2.2 Peças específicas do modelo

Após a análise do modelo da tese referida concluiu-se que para a concepção de um modelo funcional para este trabalho seria necessário dimensionar algumas outras. De seguida apresenta-se o nome e uma descrição das peças e dos motivos para certas dimensões relevantes ao projecto.

Reservatórios

Numa fase inicial pensou-se em fabricar dois reservatórios totalmente distintos e acopla-los ao corpo do modelo. Contudo, devido às medidas exteriores do modelo, verificou-se que a geometria iria ser um problema para as oscilações do modelo, criando maior amortecimento devido ao volume de água deslocado. Assim optou-se por fabricar um único reservatório dividido de forma a criar duas câmaras. O volume dos reservatórios deve ser tal que permita que todo o caudal possa entrar ao longo de uma oscilação. Neste modelo este volume não consistiu problema devido aos baixos caudais associados, calculados previamente.

(a) (b)
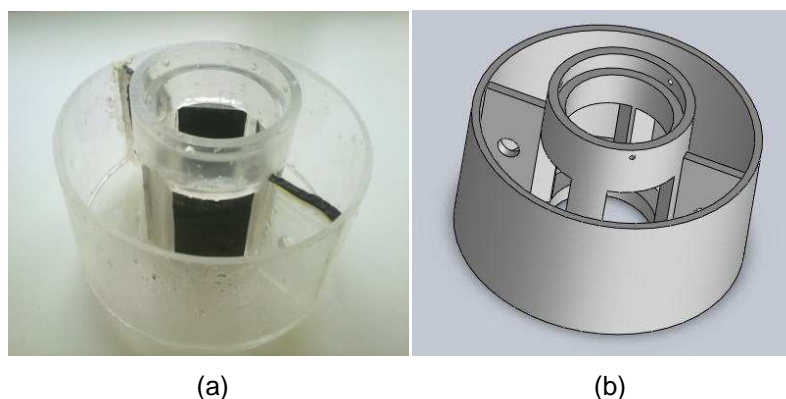
Figura 4.3: Estrutura dos reservatórios. (a) real. (b) projecto.

A concepção do reservatório como um todo é simples. Utilizam-se dois cilindros ocos ligados por duas placas finas para dividir as câmaras. Ao olhar para esta peça verifica-se que as câmaras só serão fechadas pelas tampas posteriormente. Este aspecto foi considerado de forma a se puder aceder de forma relativamente fácil às válvulas no caso de algum problema surgir. Note-se ainda que o cilindro interior é cortado com 4 entradas de dimensão considerável. Estes espaços permitem a ligação de placas planas que melhor servem os propósitos das válvulas.

Outro aspecto a considerar são os furos nas divisórias do reservatório. Uma vez que a esta escala a incorporação de turbinas é impossível, estes furos têm o objectivo de deixar passar água entre os reservatórios, simulando desta forma a perda de pressão que existiria em

situação real. No desenvolvimento do modelo pensou-se que a pressão hidrostática pudesse variar com maior intensidade do que a verificada na prática, pelo que o diâmetro dos furos criados é exagerado. Este facto implica que o caudal entre reservatórios se escoará mais rapidamente que o previsto e que portanto poderão ocorrer situações em que as pressões equilibrem antes de existirem novamente condições de abertura de válvulas. A implicação desta decisão de concepção num aparelho à escala real seria um período de tempo na oscilação sem produção de energia. Embora este aspecto possa ser à partida encarado como um erro de concepção tem a vantagem de permitir ensaiar várias amplitudes e frequências sem necessidade de ajustar o furo para o caudal pretendido, pelo que neste caso particular surgiu como um erro benéfico. Na realidade após alguns ensaios preliminares decidiu bloquear-se um dos dois furos de forma a tornar a perda de pressão gradual e que não existissem períodos de tempo sem caudal entre os reservatórios. Como se verá na secção de Resultados, esta decisão provou-se acertada uma vez que se conseguiu que a diferença de pressão entre ambas as câmaras fosse sempre superior a zero.

Tampas do reservatório (superior e inferior)

A tampa superior possui as entradas para as tomadas de pressão para os reservatórios. Ambas apresentam superfícies exteriores cónicas para facilitar o escoamento exterior da água em torno da massa adicionada. A tampa inferior faz o fecho da coluna de água ao exterior, providenciando uma superfície fechada para ser possível a desaceleração da CAO.

Tampa da bóia superior

Tem como principal função fechar a câmara de ar na bóia superior de forma a que esta não se encha de água por acção de salpicos. A acumulação de água nesta câmara poderia levar a alterações de massa e inércia do modelo, conduzindo a resultados incoerentes. Permite também a ligação a vários discos que visam alterar o diâmetro da bóia superior do modelo, através de parafusos.

Válvulas

O projecto das válvulas para este modelo apresentou-se complicado dadas as pequenas dimensões de todas as peças, as baixas diferenças de pressões envolvidas e a necessidade de não perder volume nos reservatórios. Após pesquisa no mercado verificou-se que as válvulas existentes não serviriam por violarem alguns dos requisitos, nomeadamente o terem de funcionar com baixas pressões e necessitarem de terem um pequeno volume. Sendo assim

teve que se pensar em algo que fosse de muito rápida resposta e que não permitisse a passagem de água no sentido não desejado.

Fizeram-se vários testes com diferentes materiais: uma bola de ténis de mesa cortada à dimensão (ou seja, apenas um disco côncavo) e orientada por uma gaiola, várias espessuras de borracha, alguns plásticos e finalmente com fita isoladora. Alguns testes mostraram ser eficientes na resposta ou a vedar, ou até em ambos. O caso da bola de ténis de mesa a assentar numa fina camada de borracha parecia ser uma boa solução, mas verificou-se que por vezes o disco perdia a orientação e permitia a passagem de alguma água. As borrachas mostraram ter uma boa resposta a abrir, mas no fecho a pressão não era suficiente para vedar completamente a abertura e os plásticos acusaram demasiada pressão entrando pela abertura e abrindo falhas no perímetro da abertura. Experimentou-se então a fita isoladora com resultados muito apreciáveis: boa resposta e também impermeável no fecho.

A válvula feita de fita isoladora consiste então numa tira fina que foi dobrada sobre si própria para se tornar mais rígida e não correr o risco da fita colar nalguma zona do modelo. Este rectângulo de dupla camada de fita é posteriormente colado ao modelo para que tenha liberdade de oscilação nos furos entre câmaras. Desta forma, quando a pressão é superior a jusante a válvula encosta ao modelo, selando a passagem de água e quando é superior a montante empurra a válvula, abrindo caminho para a passagem de água. Devido ao formato dos rolos de fita notou-se que a válvula tende a enrolar, pelo que deve ser esticada durante algum tempo para adquirir uma forma plana.

Figura 4.411: Válvula utilizada no modelo.

Adaptador da válvula

Esta peça foi criada com a intenção de existir uma parede plana onde a válvula de fita isoladora pudesse encostar, pois fazê-lo numa superfície curva poderia originar má vedação. Trata-se apenas de uma placa fina que encaixa nas aberturas interiores do reservatório e que possuí um furo para permitir a passagem de água. Para este modelo interessava fazer estes furos o maior possível ainda que a baixa diferença de pressão não permita a passagem de um grande caudal. Os furos serem grandes garante que o máximo de caudal passe a cada instante e que o seja feito perto de instantaneamente, de forma a que se possa fazer a aproximação de

que existe um ponto no reservatório A com velocidade nula a todos os instantes e consequentemente permitir a utilização da Lei de Bernoulli para o cálculo da velocidade.

Discos

Estas peças existem somente com o propósito de alterar o diâmetro interno da bóia superior do aparelho e desse modo mudar a aceleração da coluna de água. Pretende-se estudar se existe alterações visíveis na pressão atingida devido à forma como a CAO oscila, visto que pode criar maiores ou menores desacelerações.

(a) (b)
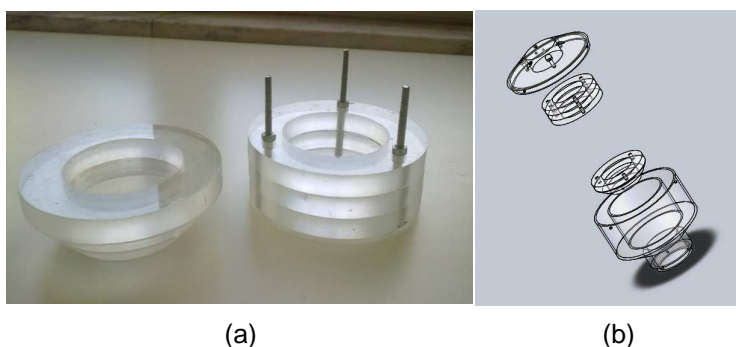
Figura 4.512: Conjuntos de discos utilizados para alteração do diâmetro interno da bóia superior. (a) real, desacoplados do modelo. (b) projecto, esquema de montagem.

4.3 A Instrumentação

4.3.1 Equipamento de Geração de Ondas

As instalações do laboratório de hidraúlica estão equipadas com um batedor no final do canal capaz de gerar ondas entre, aproximadamente, 0,01 e 0,1m de amplitude com frequências de 0,03 a 2 Hz. Este batedor é controlado com o auxílio do *software* da *HR Walling Ford* através de um controlador (representado na Figura 4.6). Este controlador permite observar em tempo real uma estimativa do erro da amplitude das ondas geradas e a variação do ganho para correcção desse erro. Associado ao controlador encontra-se um absorvedor com o objectivo de diminuir a amplitude da reflexão das ondas no batedor.
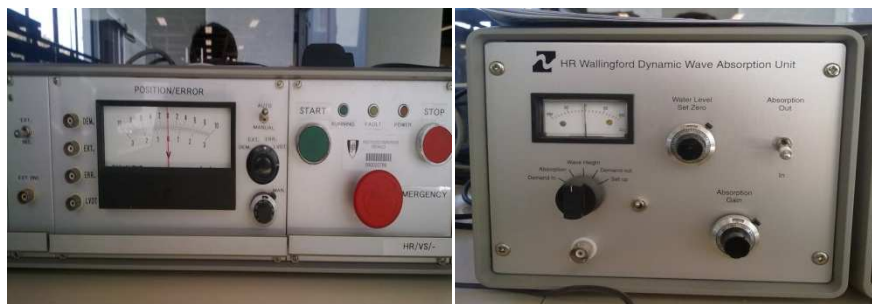
Figura 4.613: Equipamento de geração de ondas. (a) controlador. (b) absorvedor de reflexões

4.3.2 Pressão

GE Druck

O sensor de pressão utilizado durante os ensaios foi um sensor GE Druck LP 1000 series. Este sensor apenas permite fazer a leitura de diferenças de pressão para o caso desta experiência uma vez que o valor máximo que o sensor pode ler é inferior à pressão hidrostática atingida. Foi utilizado para medição das diferenças de pressão entre os dois reservatórios com maior precisão.

Figura 4.7: Sensor de pressão GE Druck utilizado

A calibração deste sensor foi feita a partir dos valores limite do sensor. Traçou-se a recta correspondente a estes dois pontos e posteriormente confirmou-se esta calibração associando o valor retornado pelo visor do sensor com a voltagem medida pela placa de aquisição.
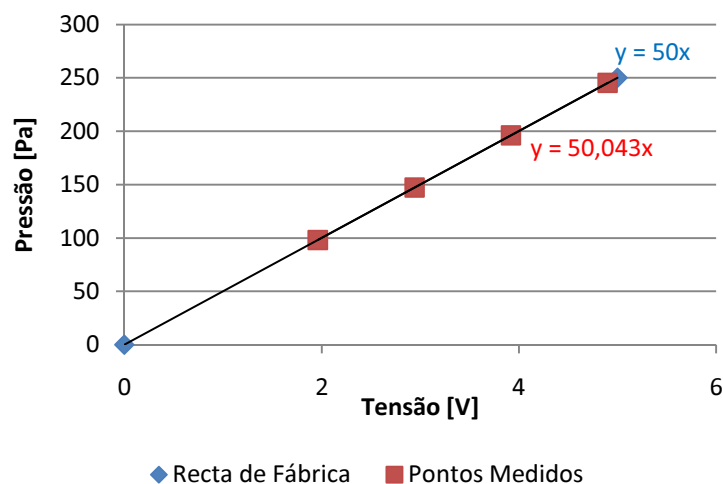
Figura 4.814: Rectas de calibração do sensor GE Druck.

Tendo em conta a semelhança das duas rectas obtidas, e uma vez que as medições feitas podem incluir efeitos de ruído, optou por utilizar-se a recta correspondente aos limites do sensor (y=50x).

Manómetro de Pressão

Ao contrário do sensor da GE Druck, este manómetro permite a leitura de pressão relativa à atmosférica devido à sua escala – até 2000 mmH_2O (200 mbar). Deste modo foi utilizado para a leitura da pressão da coluna de água e posteriormente de um dos reservatórios.

Figura 4.9: Frente do manómetro de pressão utilizado.

A calibração deste manómetro fez-se pelo mesmo método de medição que se utilizou para o sensor GE Druck. A recta de calibração foi calculada na escala do sensor, milímetros de água, tendo os valores sido convertidos posteriormente para Pascal para o enquadramento com as unidades do outro sensor de pressão.
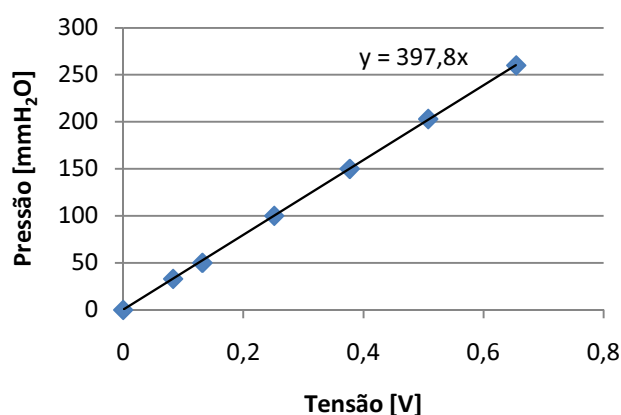
Figura 4.10: Recta de calibração do manómetro de pressão B7442.

4.3.3 Deslocamentos

Sonda de Nível

Utilizou-se uma sonda de nível para verificar a altura da onda incidente, permitindo a redução de erros devido a amplitudes incorrectas. Esta sonda foi localizada à frente do modelo relativamente à incidência da onda, não sendo portanto a leitura afectada directamente pela movimentação do modelo. O atraso consequente da distância existente entre a sonda e o modelo foi corrigido no tratamento de dados.

A leitura dos sinais vindos das sondas é feito por um equipamento denominado de *Wave Probe Monitor*. Este aparelho opera sobre a escala de tensão recebida, amplificando-os para a gama -10 a 10V. É também neste aparelho que se faz o ajuste do zero das sondas.

(a) (b)
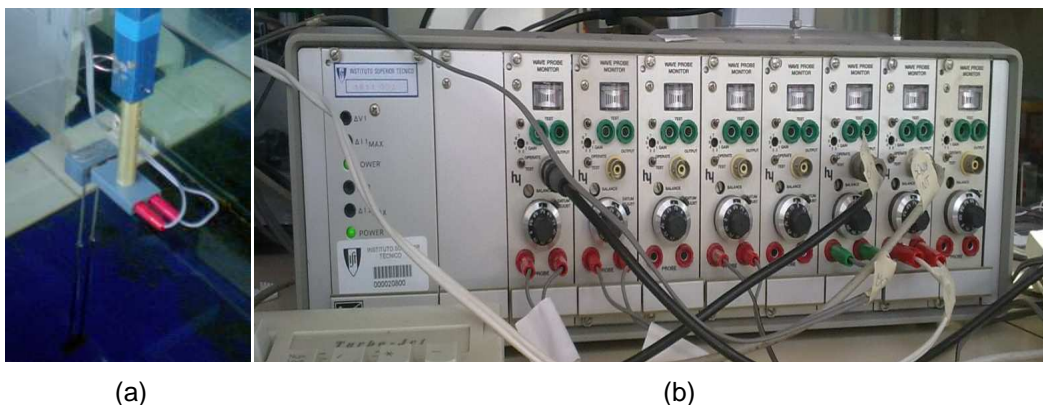
Figura 4.11: (a) sonda de nível utilizada para medir nível da onda incidente. (b) *Wave Probe Monitor*.

A calibração desta sonda seguiu os mesmos moldes das anteriores. A estrutura da sonda possui orifícios que a permitem subir ou descer com 1cm de espaçamento. Fizeram-se várias medições calculando-se posteriormente a respectiva recta de regressão.
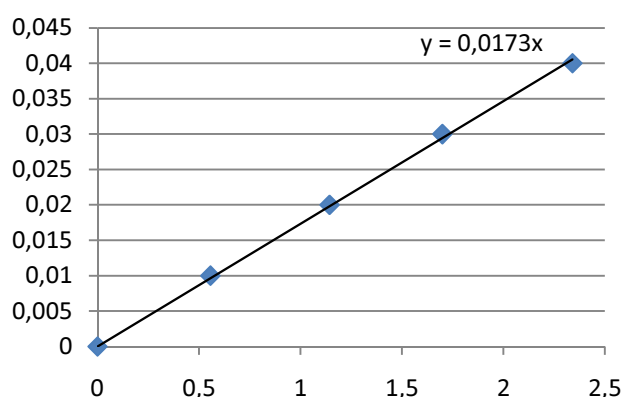
Figura 415.12: Recta de calibração da sonda de nível

Esta sonda é muito sensível e com o decorrer dos ensaios, alteração da temperatura da água e pequenas perdas de água do canal foi necessário ajustar o seu zero várias vezes entre ensaios.

Laser

Para a medição do deslocamento do modelo recorreu-se a um laser, modelo da *KEYENCE*, fixo numa zona superior ao modelo. Este laser permite alta precisão na leitura da altura da oscilação. A utilização deste laser obrigou à criação de uma zona opaca na superfície superior do modelo de modo a que pudesse ser reflectido. O laser foi fixo a uma placa no topo do canal (ver Figura 4.1) por intermédio de uma calha metálica que também auxiliou a sua calibração.

Figura 4.13: Laser utilizado para a medição do deslocamento do modelo.

Este sensor possui a particularidade de não descalibrar sendo apenas necessário o ajuste do seu zero, isto é, a adição de uma constante. A recta de calibração apresentada corresponde à calculada pelos limites do sensor. A constante que define o zero foi ajustada antes de qualquer ensaio com o modelo em repouso, devido a pequenas perdas de água no canal de ondas utilizado.
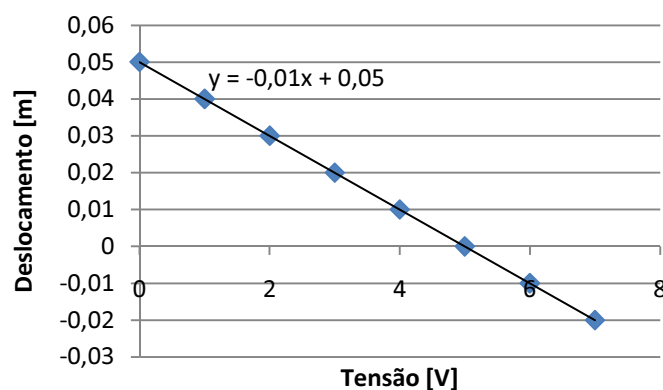
Figura 4.14: Recta de calibração do laser.

4.3.4 Placa e Programa de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi feita através de uma placa PCMCIA NI DAQCard-6024 E, montada previamente no decorrer dos ensaios da tese de Tiago Duarte. No decurso dos ensaios referentes a este trabalho apenas se teve de proceder à ligação dos terminais do manómetro de pressão, confirmando-se também as ligações já existentes. A placa permite a aquisição de uma vasta gama de tensões, sendo que os sinais adquiridos se encontravam entre ±10 V ou ±5 V. A definição destes intervalos permitiu optimizar a resolução e a precisão da placa para cada sinal (ver tabela 4.1).

Para proceder à interpretação dos sinais adquiridos pela placa procedeu-se à programação em *LabView* (imagens em anexo). Neste, faz-se a aquisição dos sinais e a

transformação destes para as variáveis pretendidas segundo a calibração de cada sensor. É feita a apresentação das variáveis no painel frontal para a análise durante os ensaios.

Gama de Aquisição (V)	Resolução (mV)	Precisão (mV)
±10	4,882	19,012
±5	2,441	6,517

Tabela 4.3: Gama dos sinais na placa de aquisição

4.4 Ensaios Realizados e Repetibilidade

Ao longo deste trabalho foram realizados vários testes, em que se pretendeu adquirir sempre as mesmas grandezas: pressões e posição do modelo relativamente à água. É necessário ter informação quanto à posição do modelo para perceber em que ponto da oscilação o modelo se encontra para as diferentes pressões adquiridas. Após os primeiros testes verificou-se que a frequência de ressonância do próprio modelo não permitiria testes em oposição de fase à da onda. Estes testes permitiriam englobar e analisar os efeitos combinados de variações de pressão hidrostática e dinâmica resultante da desaceleração da coluna de água. Não podendo realizar estes ensaios decidiu analisar-se apenas o efeito separado da desaceleração e portanto restringiram-se as frequências testadas a um valor superior de 1.2 Hz. Acima desta frequência foi possível observar a passagem ocasional de ondas por cima do modelo, influenciando a pressão hidrostática da coluna de água.

Embora se pudessem testar várias combinações geométricas alterando a quantidade de discos superiores e inferiores utilizados pretendeu-se apenas estudar qual a situação mais favorável entre quatro diferentes combinações: sem discos, com todos os discos, apenas com discos inferiores e apenas com discos superiores. Como referido na secção referente às peças do modelo estes discos têm a função de alterar o diâmetro interno da bóia superior e desse modo alterar a aceleração/desaceleração da CAO. Para estas situações testaram-se várias frequências de onda e várias amplitudes de forma a se entender quais as melhores condições de mar para um modelo deste tipo. Os ensaios foram realizados para uma variedade de amplitudes e frequências ampla, sendo que ao longo desta dissertação apenas se incluirão regularmente quatro casos de cada: 4, 6, 8 e 10 cm de amplitude e 0.6, 0.8, 1.0 e 1.2 Hz. Estes valores foram escolhidos por apresentarem intervalos regulares entre si, tendo também em conta os limites inferiores para os quais se conseguiam leituras consistentes.

Para a obtenção de resultados mais fiáveis os testes foram feitos várias vezes para cada caso. Todos os testes foram realizados em regime estacionário, quando todos os sinais apresentavam amplitudes estáveis.

A instrumentação disponível para os ensaios condicionou o modo como estes foram feitos. Tendo um leitor de pressão para a pressão relativa à atmosférica e outro para diferenças de pressão tornou-se impossível fazer a medição de todas as grandezas simultaneamente, realizando-se dois ensaios para cada geometria e estado de mar testados. Num primeiro ensaio procedeu-se à medição da diferença de pressão entre reservatórios, da pressão total no reservatório A, da amplitude da onda incidente e dos deslocamentos do modelo. No segundo ensaio alteraram-se as tomadas de pressão para fazer a leitura da diferença de pressão entre o reservatório A e a coluna de água, mantendo-se a leitura da pressão total do reservatório A. Deste modo, aliando a análise dos deslocamentos e da pressão registada em A pode monitorizar-se a compatibilidade dos ensaios. Apenas se registaram valores quando se obteve uma compatibilidade elevada (mínimo de 95% dos sinais lidos no primeiro ensaio tendo atenção à frequência e amplitude dos sinais) de forma a permitir a comparação entre ensaios.

4.5 Metodologia dos Ensaios

A realização dos ensaios seguiu uma metodologia previamente determinada, de forma a reduzir ao máximo a ocorrência de erros sistemáticos. Esta medida associada à repetibilidade dos ensaios garante a fidelidade das medições.

O procedimento seguido para o primeiro ensaio foi:

1. Escolher a geometria a usar;
2. Montar o modelo na posição de teste;
3. Ajustar do volume de água dentro dos reservatórios através da libertação de ar pelas mangueiras de pressão;
4. Ligar os sensores de pressão e o laser;
5. Ligar o programa de aquisição de dados
6. Ajustar o zero da sonda de nível e do laser;
7. Ligar o controlador e absorvedor do canal;
8. Gerar onda com características desejadas;
9. Verificar as características da onda até cumprir os requisitos;
10. Verificar que os sinais se encontram todos em regime estacionário;
11. Guardar os resultados;
12. Parar a geração de onda e esperar até o nível da água voltar a zero;
13. Repetir os passos de 8 a 12 para todas as características desejadas e o número de vezes necessário para cada ensaio;

14. Repetir passos de 1 a 13 para as quatro geometrias em teste.

O segundo ensaio repete os passos acima descritos sendo necessária a confirmação da compatibilidade dos deslocamentos e da pressão no reservatório A com os testes do primeiro ensaio. Esta confirmação da compatibilidade faz-se no passo 10 do procedimento descrito atrás. De notar que a viabilidade do segundo ensaio começa no acerto do volume de água nos reservatórios, uma vez que afecta a pressão total lida. Desta forma, na respectiva etapa do procedimento é necessário garantir que a pressão no reservatório A é a mesma que registada no primeiro ensaio.

Capitulo 5

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo vão ser apresentados e explicados os tratamentos aplicados aos sinais adquiridos. De seguida apresentam-se os resultados experimentais obtidos, sendo estes analisados e discutidos ao longo de todo o capítulo.

No fim da análise dos resultados experimentais faz-se uma comparação com o modelo teórico de cálculo da pressão atingida na coluna de água de modo a se obter uma estimativa do erro entre a teoria e a prática. Esta comparação permite fazer uma previsão dos resultados esperados num modelo a uma escala real e consequentemente da viabilidade de um dispositivo de aproveitamento do efeito testado nesta dissertação.

5.1 Verificação da Validade das Válvulas

O primeiro ensaio realizou-se ainda com o modelo desmontado. Era fundamental garantir que as válvulas pouco tradicionais utilizadas cumpriam a sua função da forma esperada. Desta forma testou-se a impermeabilidade das válvulas e a sua resposta.

O teste de impermeabilidade consistiu no enchimento das câmaras correspondentes a cada conjunto de válvulas com água até uma altura semelhante. Estando o sistema estável adicionou-se um pequeno volume de água com corante à câmara responsável pelo fecho das válvulas e ao longo de um período de uma hora verificou-se se água com corante aparecia na outra câmara.

Figura 5.1: Teste das válvulas utilizadas nos ensaios. (a) Corante no reservatório A. (b) Corante no reservatório B.

Como se pode observar na Figura 5.1 o corante mantém-se no reservatório onde foi inserido, mesmo após misturado com uma vareta. No caso do corante no reservatório B

verifica-se que a água na coluna central fecha as válvulas correctamente, sendo que a pequena fracção de corante que é possível identificar nesta zona se deve a uma perda aquando da mistura com a vareta. Este facto, assim como o fecho das válvulas se dar para uma diferença de alturas de água inferior a 1 mm, ajuda a perceber a elevada sensibilidade das válvulas. De notar também que durante este teste o reservatório foi movido várias vezes de posição para atestar que pequenas movimentações do fluído não comprometem a impermeabilidade das válvulas.

5.2 Tratamento dos Sinais

Num trabalho experimental desta natureza é fundamental tratar os sinais recebidos para obter resultados com maior fidelidade e consistência. É sabido que na aquisição de sinal o ruído pode fazer variar as medições e alterar os resultados. Na Figura 5.2 pode observar-se um sinal do sensor de pressão GE Druck e um do manómetro utilizado

.
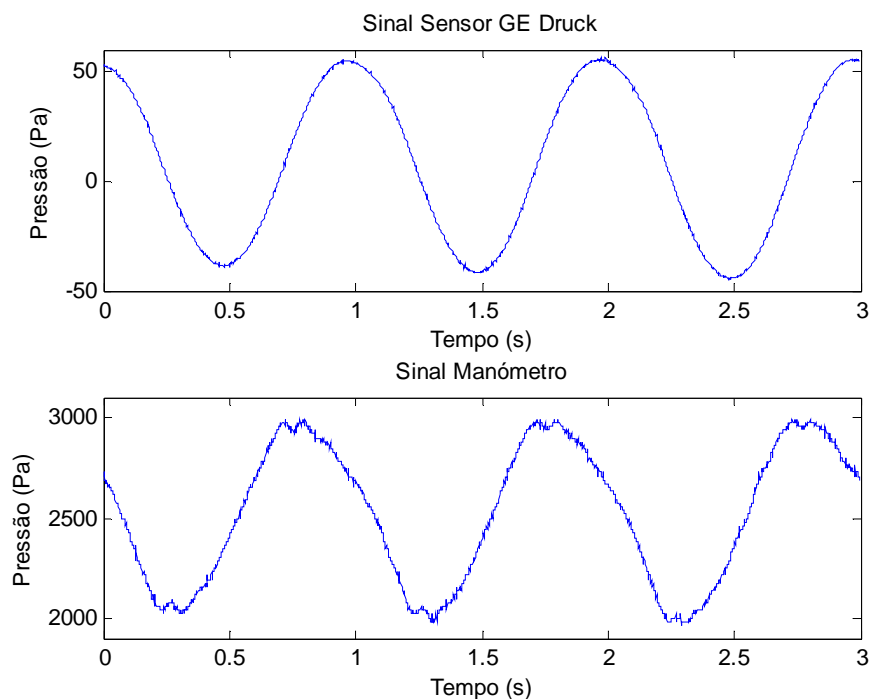
Figura 5.2: Sinais reais dos dois sensores de pressão

Verifica-se a existência de ruído nos sinais, principalmente no proveniente do manómetro devido a maior sensibilidade por parte deste. Além do ruído observa-se que os sinais não estão em fase, o que indica atraso na leitura de um sensor relativamente ao outro. Este atraso não deveria existir uma vez que os tubos de ligação às tomadas de pressão dos dois sensores se

encontravam no mesmo local, lado a lado, e portanto encontravam-se sobre a mesma acção por parte da onda.

Outro erro inerente são pequenas flutuações na amplitude do sinal. Estas flutuações acontecem devido ao facto das ondas incidentes não serem sempre da mesma amplitude e também devido ao facto dos tubos que fazem a ligação entre as tomadas de pressão e os manómetros se deslocarem com o modelo. Estes erros podem na generalidade ser corrigidos para a obtenção de um sinal mais estável. No entanto existirão situações em que será necessária a análise de sinais não tratados.

Atraso sensor, manometro e sonda de nível

Com o decorrer dos ensaios tornou-se evidente que o sensor de pressão GE Druck continha um atraso considerável na leitura. Este foi determinado relativamente à leitura de posição feita pelo laser. Uma vez que ambos os sinais possuem a mesma frequência optou-se por determinar o desfasamento a partir dos máximos e mínimos dos sinais em intervalos equivalentes a uma oscilação. Assim, calculou-se o atraso do sinal para vários intervalos consecutivos e posteriormente calculou-se a média deste atraso. Este procedimento foi repetido para vários ensaios distintos a diferentes amplitudes e frequências. No final obteve-se um atraso médio de 293ms para o sensor GE Druck. Uma vez mais, os tubos de ligação encontravam-se colocados na zona de medição do sensor laser, tendo sido colocadas para que não existisse desfasagem entre os sinais.
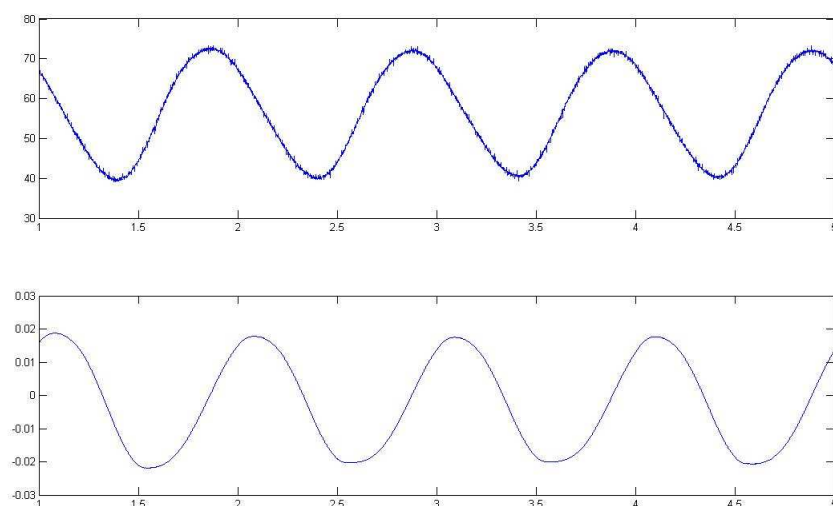
Figura 5.3: Desfasamento dos sinais de deslocamento medido com laser e de pressão com o sensor GE Druck.

Olhando para a Figura 5.3, os mínimos no sinal superior deveriam estar em fase com os máximos do sinal abaixo. Este facto deve-se à natureza do ensaio realizado que contava com um tubo de ligação fixo ao canal a uma determinada profundidade e outro fixo ao modelo, em oscilação. Deste modo, no momento em que o modelo atinge a maior profundidade dá-se a maior diferença de pressão entre tomadas e vice-versa.

O procedimento foi repetido para o manómetro e sonda de nível com resultados de 3ms e 140ms respectivamente.

FFT

Uma vez que os sinais são aproximadamente sinusoidais, recorreu-se à utilização do método de *Fast Fourier Transform* (FFT) para aproximar as leituras a um sinal estável e limpo de ruído. Este tratamento calcula a média do sinal, a sua amplitude máxima, fase e frequência, permitindo posteriormente a utilização destes valores para a construção do sinal limpo. No entanto, embora o tratamento limpe os sinais do ruído, permitindo a utilização dos seus valores, cria pequenos erros de amplitude em intervalos do sinal. Nos casos em que o sinal real não é sinusoidal, nomeadamente quando ocorrem patamares, os sinais foram analisados sem tratamento. Para comparação entre o mesmo tipo de sinais serão sempre apresentados os sinais tratados.
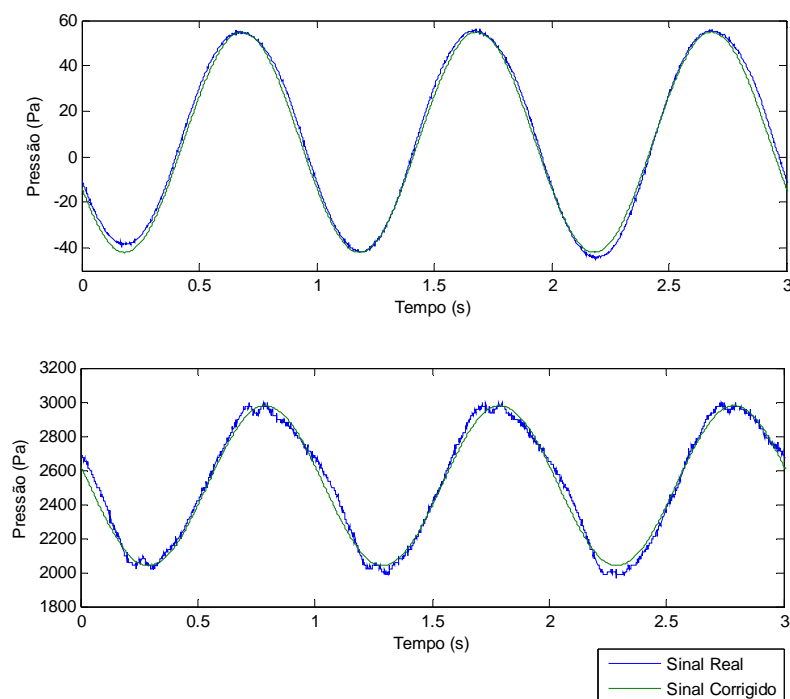
Figura 5.4: Comparação entre os sinais reais e corrigidos dos sensores de pressão

Erro de desaceleração do sensor

A análise deste erro surge devido ao facto dos tubos de ligação às tomadas de leitura de pressão poderem não ter reacções idênticas ao movimento. Deste modo, e para se medir a diferença, procedeu-se a um ensaio em que ambos os tubos de ligação foram presas ao modelo exactamente à mesma profundidade. Pôde assim averiguar-se qual a diferença entre leituras com as oscilações.

Figura 5.5: Fotografia da montagem utilizada para os ensaios do erro de desaceleração
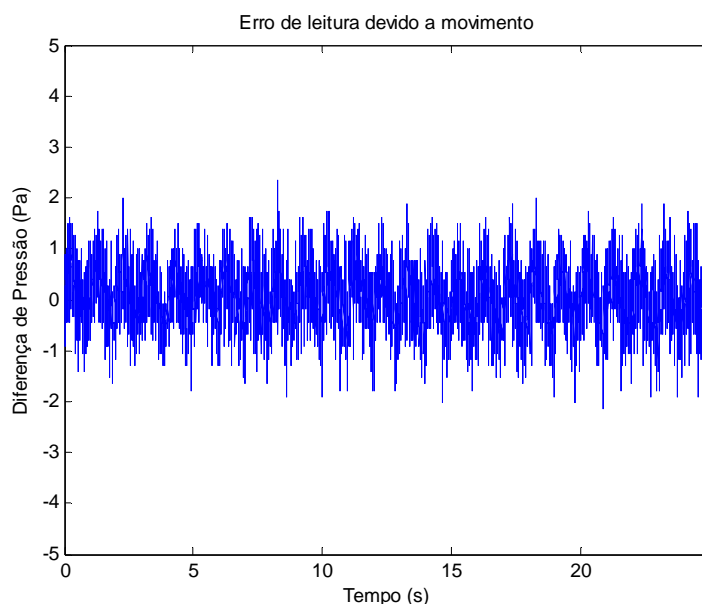
Figura 5.6: Erro de leitura do sensor GE Druck devido ao movimento das tomadas de pressão

Da análise do sinal obtido na Figura 5.6 calculou-se um erro máximo devido ao movimento de 2,47 Pa. Contudo, e uma vez que interessa a banda de erro mais frequente deste sinal procedeu-se a um refinamento, em que as flutuações aleatórias foram minimizadas. Admitiu-se que tal se podia fazer até existirem dez pontos com a mesma amplitude, isto é, procedeu-se a uma procura a partir dos pontos de maior amplitude para os de menor amplitude até chegar a valores que ocorriam com maior frequência, tendo sido definido como critério de paragem da procura uma frequência de dez pontos com o mesmo valor medido. Desta forma reduziu-se o erro máximo para 1,89 Pa. Num sinal cuja amplitude registada varia de 20 Pa a 90 Pa este erro significa 9,45% a 2,1% do sinal. Os gráficos e valores apresentados ao longo do Capítulo 5 terão este erro já corrigido.

5.3 Comparação de Geometrias

Embora a comparação de geometrias fosse um objectivo secundário desta dissertação é importante a sua análise antes de se analisar o potencial do modelo, para que este possa ser encarado na sua plenitude. Ao longo do texto que se segue serão comparadas sempre as mesmas quatro geometrias: com discos, sem discos, com discos superiores e com discos inferiores. De notar que a geometria *com discos* engloba o uso de discos superiores e inferiores simultaneamente.

5.3.1 Deslocamentos

A primeira comparação deve ser feita a nível dos deslocamentos do modelo. O facto de existir alteração da geometria, ainda que interior, levanta a possibilidade de diferenças na amplitude das oscilações do modelo. A alteração de geometria leva também a uma alteração de massa e consequentemente da inércia total.
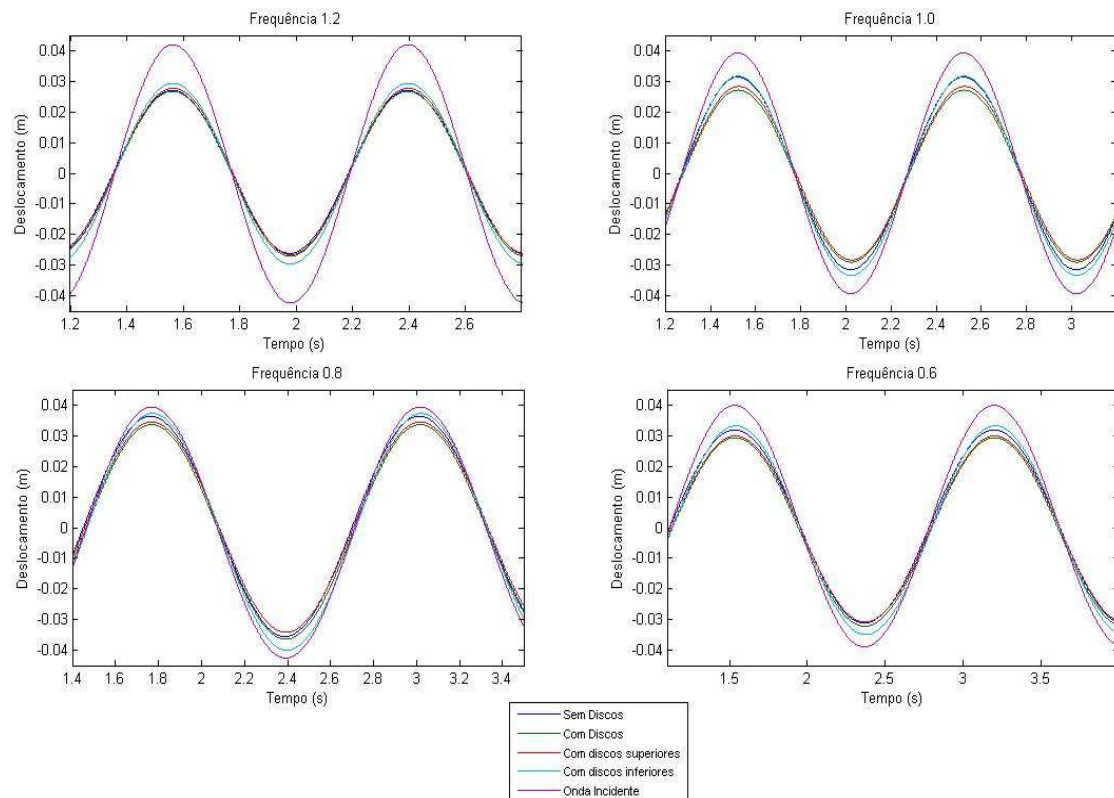
Figura 5.7: Gráficos comparativos do deslocamento do modelo para várias frequências e geometrias

Ao analisar a Figura 5.7 percebe-se que para as geometrias com todos os discos e com discos superiores o amortecimento da oscilação é maior devido à maior inércia, mas não possui um efeito muito acentuado. Esperar-se-ia que a geometria com discos inferiores fosse também afectada pelo aumento de massa, mas pode observar-se que as oscilações correspondentes são semelhantes às da geometria sem discos. Verifica-se que para a frequência 0.8 Hz a amplitude do deslocamento é maior que nos restantes casos, estando-se provavelmente perto de uma frequência secundária própria do modelo. Neste caso não será a frequência de ressonância uma vez que nesse caso a amplitude da oscilação deverá ser superior à da onda incidente. De notar também que, na Figura 5.7 – ii, a amplitude da onda incidente é inferior ao pretendido, levando a que todas as curvas sejam do mesmo modo afectadas. Ainda da análise da figura conclui-se que a oscilação do modelo diminui para frequências superiores a 0.8Hz, devendo-se a uma conjugação de esforços hidrodinâmicos e da inércia do modelo, levando a que o modelo não conclua a trajectória da onda na sua totalidade. Conclui-se portanto que com a continuação de aumento da frequência as oscilações do modelo serão mais reduzidas. A análise gráfica é completada com os valores apresentados na tabela 5.1.

Frequência (Hz)		Onda Incidente (cm)	Sem discos (cm)	%	Com discos (cm)	%	Com discos superiores (cm)	%	Com discos Inferiores (cm)	%
1.2	Máx	4.20	2.71	62	2.68	64	2.77	63	2.94	70
	Mín	-4.24	-2.62		-2.71		-2.66		-2.96	
1.0	Máx	3.93	3.14	80	2.72	70	2.83	72	3.17	85
	Mín	-3.94	-3.15		-2.90		-2.83		-3.33	
0.8	Máx	3.94	3.64	88	3.36	85	3.45	84	3.73	94
	Mín	-4.26	-3.55		-3.64		-3.42		-4.00	
0.6	Máx	3.99	3.19	80	2.94	78	2.99	78	3.32	86
	Mín	-3.89	-3.11		-3.22		-3.08		-3.49	

Tabela 5.1: Valores máximos e mínimos do deslocamento do modelo para as diferentes geometrias e da onda incidente

5.3.2 Pressão na base da Coluna de Água

Após a análise dos deslocamentos pode agora comparar-se a pressão total atingida na base da coluna de água nas quatro diferentes geometrias. Esta comparação deve ser feita tendo em conta variações de amplitude e frequência, de modo a se compreender em que condições cada geometria pode retirar melhores vantagens. Esta análise é relevante para se perceber o efeito que cada geometria tem nas variações de pressão.
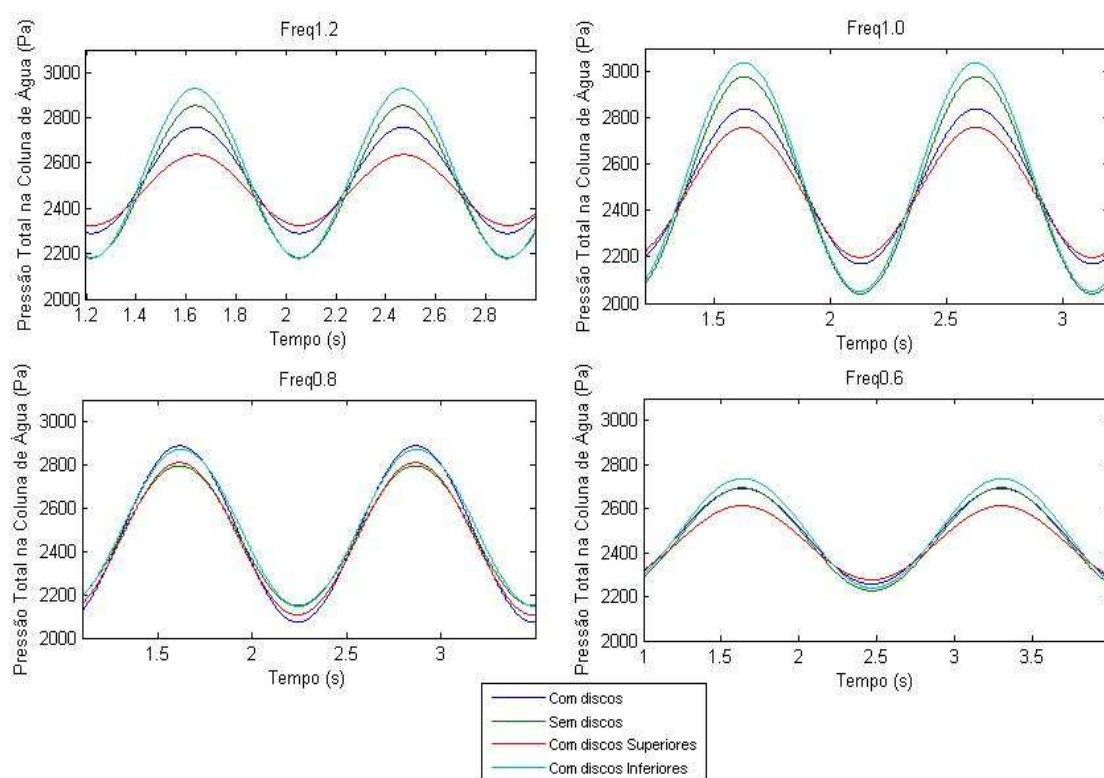
Figura 5.8: Gráficos comparação da pressão da CAO para várias frequências e geometrias

Da análise da Figura 5.8 verifica-se que a evolução com a frequência dentro da mesma geometria é semelhante para todos os casos ensaiados. A pressão aumenta até 1.0 Hz, embora a oscilação seja maior para 0.8 Hz, sendo atenuada para frequências superiores. Em frequências ligeiramente superiores à de ressonância a desaceleração da CAO é mais brusca e a diferença no deslocamento acaba por não afectar significativamente a pressão atingida. No entanto, para frequências sucessivamente maiores o efeito da amplitude do deslocamento torna-se mais intenso que o causado pela cada vez mais repentina desaceleração. Para frequências inferiores os dois efeitos somam-se e actuam negativamente sobre a pressão criada.

Comparando agora as geometrias entre si facilmente se repara que as variações da geometria apenas com discos inferiores são muito mais acentuadas que as das restantes geometrias. Verifica-se também que nas geometrias com discos e com discos superiores a pressão reflecte o aumento de massa e inércia, sofrendo uma atenuação mais intensa. Para uma melhor avaliação dos efeitos dos discos superiores é necessária a criação de uma massa ajustável noutra parte do modelo, o que não foi considerado neste trabalho.

Quanto à comparação com variação de amplitudes observa-se o crescimento de todas as curvas com o aumento de amplitude, sendo que novamente a geometria com discos inferiores demonstra as maiores variações. Nota-se no entanto que para amplitudes pequenas a existência de discos inferiores tem um efeito nefasto nos valores máximos da pressão na CAO.
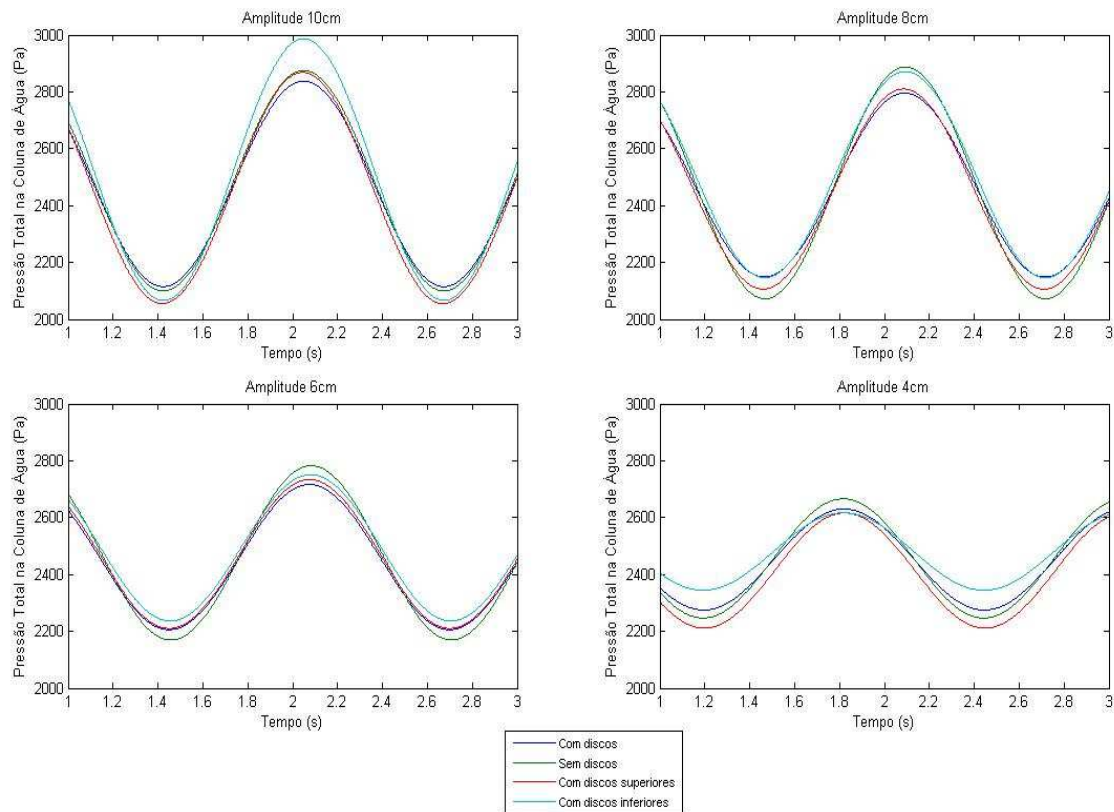
Figura 5.9: Comparação da pressão da CAO para várias frequências e geometrias

Convém explicar que as alterações díspares da geometria com discos inferiores se devem ao efeito que estes têm no caudal que sai da bóia superior pela abertura na coluna. Possuindo uma conduta de menor diâmetro mais longa permite que a velocidade da água que a atravessa estabilize em valores maiores, tornando a seguinte desaceleração mais brusca.

Da análise das duas figuras consideradas conclui-se que as geometrias com melhor resposta a nível da pressão são a sem discos e a com discos inferiores. As restantes duas geometrias são demasiado dependentes das baixas frequências pelo que possuem uma gama de boa eficiência muito mais reduzida. É no entanto conveniente analisar a diferença de pressão atingida entre os dois reservatórios, uma vez que apesar da pressão na base da CAO apontar para a primazia das geometrias referenciadas, se deve considerar a hipótese das variações de pressão nos reservatórios puderem não corresponder da mesma forma.

5.3.3 Diferença de Pressão entre Reservatório A e B

Analisou-se a variação da pressão total na coluna de água e concluiu-se que para amplitudes mais elevadas o efeito dos discos inferiores se intensifica com maior relevância do

que nos outros casos. É importante agora analisar a que correspondem estas variações de pressão na base da CAO em termos de diferença de pressão entre os dois reservatórios. Este é realmente o factor determinante na decisão da melhor geometria uma vez que se irá traduzir directamente na potência possível de se extrair.

Em primeiro lugar fica patente que as aparentemente pequenas diferenças de pressão na CAO têm maior relevância na diferença de pressão entre os reservatórios. Anteriormente viu-se que para uma amplitude de onda de 8 centímetros e frequência de 0.8 Hz as geometrias com discos inferiores e sem discos se sobressaiam das restantes. No entanto a diferença observada na Figura 5.10 é muito mais gradual entre geometrias, sem se observar um salto único entre as duas piores e as duas melhores. Na realidade a diferença de pressão entre reservatórios nos ensaios com discos inferiores é menor que o esperado, visto que deveria adoptar um valor similar à geometria sem discos (da mesma forma que a pressão na CAO). Esta diferença, voltando à análise da coluna de água, deve-se a pressões máximas menos intensas e pressões mínimas mais intensas. Estas pequenas variações relativamente à geometria sem discos resultam em pressão ligeiramente inferior no reservatório A e ligeiramente superior no B, que somados os efeitos resultam numa menor diferença entre reservatórios.
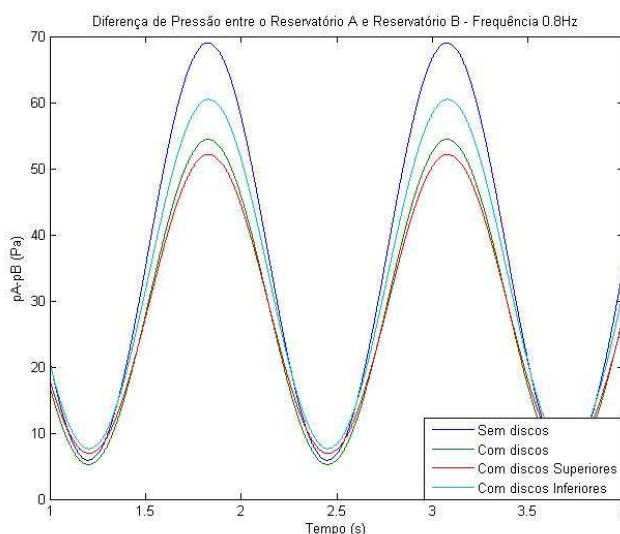
Figura 5.10: Comparação entre geometrias da diferença de pressão entre reservatórios para onda de 8 cm.

As evoluções apresentadas nas figuras 5.10 e 5.11 levam a que se prevejam maiores diferenças de pressão para a geometria com discos inferiores para a amplitude de 10 cm e as frequências de 1.0 e 1.2 Hz. Conclui-se portanto que para condições mais extremas das ondas é preferível a utilização de discos inferiores. De seguida apresentam-se a comparação da diferença de pressão entre A e B para várias frequências e amplitudes de onda.
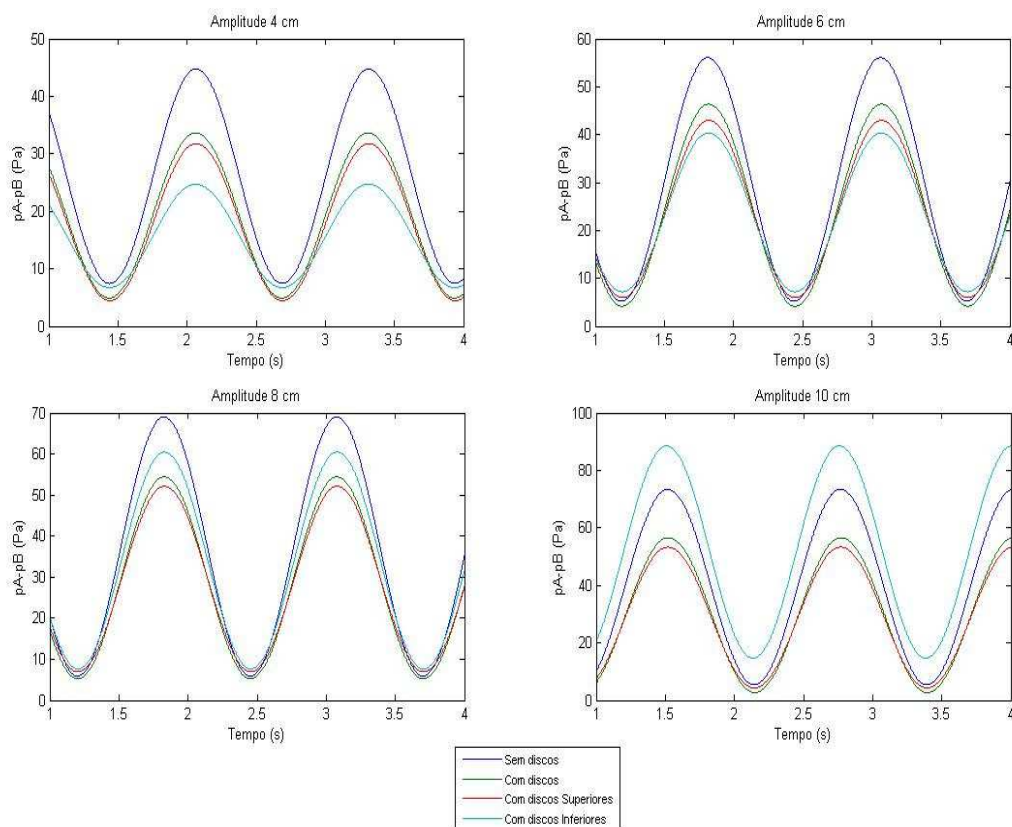
Figura 5.11: Comparação das evoluções da diferença de pressão entre reservatórios para várias amplitudes de onda para 0.8 Hz

A análise da Figura 5.11 mostra que a geometria sem discos produz melhores resultados que as restantes para uma gama mais larga de amplitudes. Verifica-se como esperado que para amplitudes grandes a geometria com discos inferiores passa a ter melhor resposta a nível da diferença de pressão. Os discos inferiores tornam-se mais eficientes para maiores alturas de onda devido à posição média da superfície livre ser superior, o que leva a maiores amplitudes de oscilação da CAO. Esta conclusão leva a crer que seria benéfica a inclusão de um sistema adaptativo do diâmetro interior e inferior da bóia. Um conjunto de sensores recolheria informações relativamente às condições do mar, sendo depois calculada o melhor diâmetro e altura dos discos inferiores. Utilizando uma solução deste género aumenta-se a eficiência da desaceleração para as diferentes condições existentes.
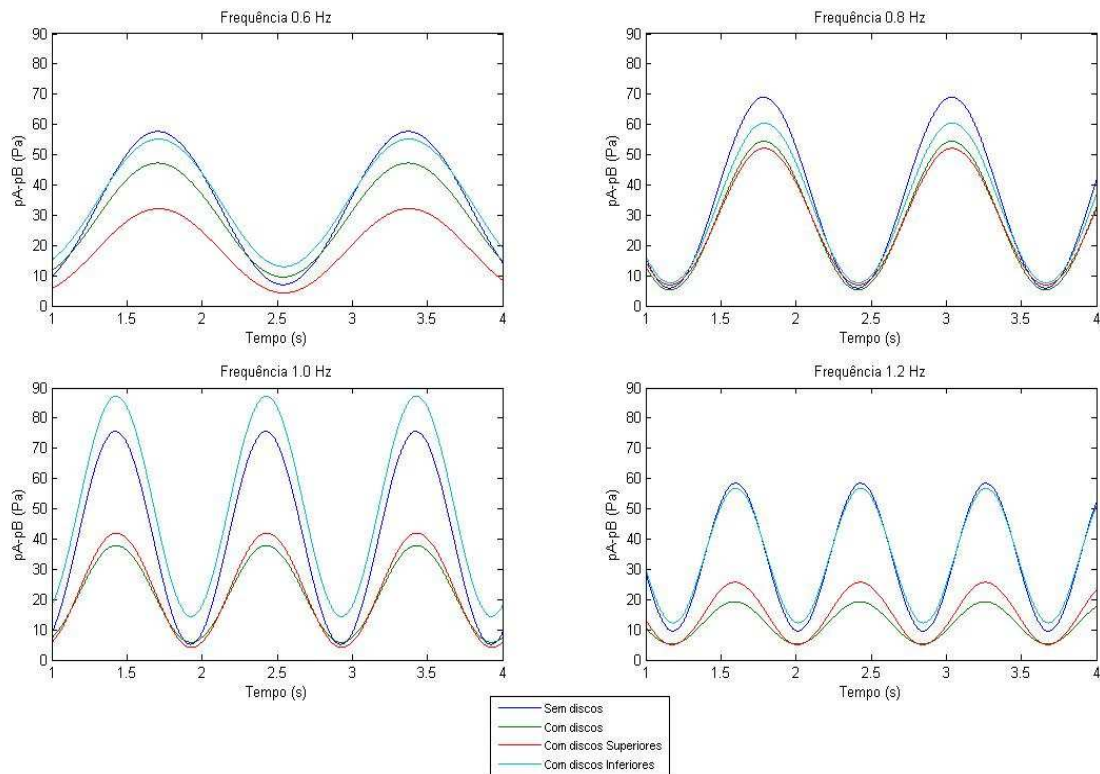
Figura 5.12: Comparação das evoluções da diferença de pressão entre reservatórios para várias frequências para uma onda de 8 cm.

As mesmas conclusões se podem tirar da análise da diferença de pressão entre A e B a variar com a frequência.

Juntando os resultados até agora analisados parece poder concluir-se que as geometrias que incluem discos superiores na sua composição não parecem ser as mais eficientes. Os discos superiores parecem apenas aumentar a inércia do aparelho, levando em geral a pressões mais baixas. Para se puder concluir com certeza que a inclusão dos discos superiores não oferecem vantagem significativa para a criação de maiores diferenças de pressão é necessário testá-los num modelo que permita manter a massa total e inércia.

Entre as duas geometrias restantes pensa-se que a melhor solução seria uma composição automática e inteligente das duas. No caso desta solução se tornar demasiado dispendiosa elege-se o caso sem discos como melhor geometria. As vantagens desta são a melhor resposta para baixas frequências e amplitudes e a obtenção de boas respostas para os restantes estados do mar, tornando esta geometria muito estável. A estabilidade da resposta é importante uma vez que garante boa geração de energia numa vasta gama de condições marítimas. A geometria com discos inferiores falha precisamente em manter esta estabilidade, apresentando variações de pressão muito mais reduzidas para baixas amplitudes e frequências que a geometria sem discos.

5.4 Melhor Geometria – Sem Discos

Na secção anterior, de análise à melhor geometria, pode concluir-se que as situações mais favoráveis à criação de maiores diferenças de pressão ocorrem para amplitudes de 8 ou 10 cm e frequências de 0.8 e 1.0Hz. Embora esteja presente que a gama de ondas no mar é muito alargada, concentraram-se os seguintes testes nestas amplitudes e frequências, para se estudar o caso mais provável de pico de potência do dispositivo. Deste modo, estes casos serão agora comparados em maior detalhe. Após inferido qual é realmente o melhor estado testado serão então analisados todos os efeitos relevantes nas variações de pressão e as suas consequências.

É fácil identificar na Figura 5.13 que 10 cm de amplitude e 1.0Hz de frequência correspondem ao melhor estado das ondas, em termos de diferenças de pressão criadas, para o modelo e condições testados.
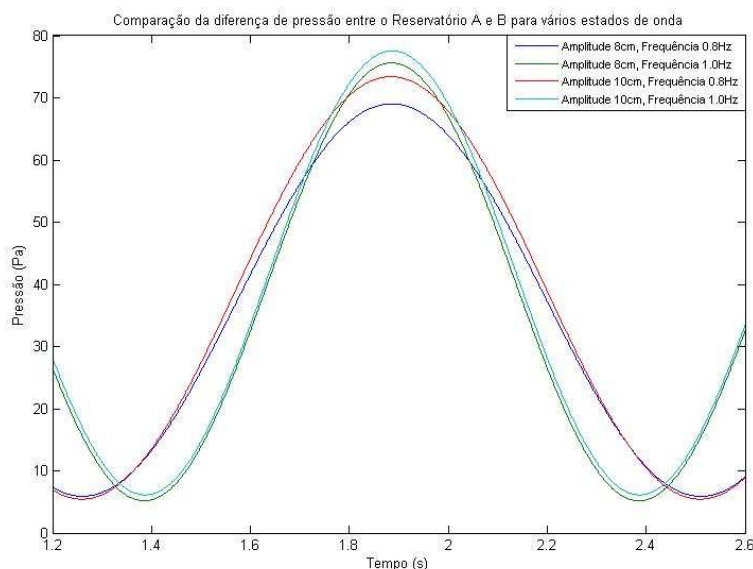
Figura 5.13: Comparação entre os melhores estados de onda para a geometria sem discos

5.4.1 Deslocamento do Modelo e Onda incidente

Anteriormente, na comparação de geometrias, os sinais da onda incidente e do deslocamento do modelo foram ajustados perfeitamente em termos de fase para permitir uma melhor comparação da amplitude de ambos. Agora, na Figura 5.14, pode ver-se a diferença de fase no movimento do modelo para com a onda incidente. Note-se que o sinal foi transportado para o local da bóia de modo, o que permite fazer esta comparação. Esta diferença deve-se à inércia do aparelho, que faz com que no pico de uma crista de onda o modelo ainda possua velocidade ascendente e que portanto continue a subir embora a onda incidente já se encontre

numa posição inferior. Esta diferença de fase tem algumas consequências quanto ao nível da coluna de água. No movimento descendente da onda a diferença de pressão hidrostática leva a que a velocidade de saída da água da CAO aumente. Esse efeito é benéfico enquanto o aparelho se encontra em movimento ascendente e a onda em descendente uma vez que privilegia a desaceleração da CAO em relação ao aparelho. No entanto, quando o modelo passa ao movimento descendente o efeito passa a ser de oposição à desaceleração, pois um maior caudal a sair da bóia superior fará maior oposição à água da coluna na zona inferior, não a permitindo ter um movimento contrário ao do aparelho tão forte como o que aconteceria se a fase fosse perfeita.
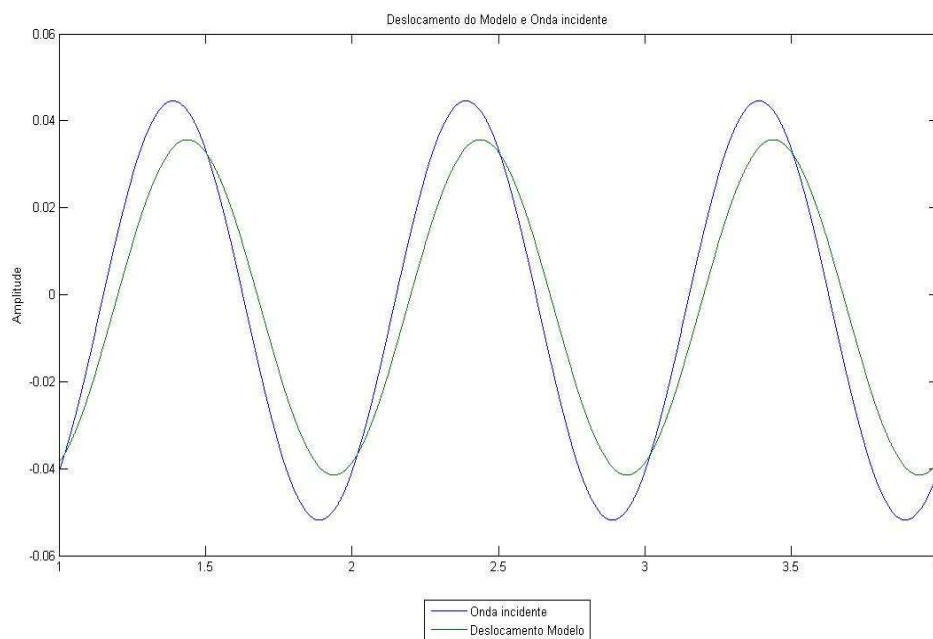
Figura 5.14: Comparação entre a onda incidente (10 cm e 1.0Hz) e o deslocamento do modelo

5.4.2 Pressão coluna de água

Na análise das diferentes geometrias utilizou-se sempre o sinal tratado pela transformada de Fourier, uma vez que esta tem o mesmo efeito em todos os sinais. No entanto é interessante analisar o sinal real da pressão na CAO.
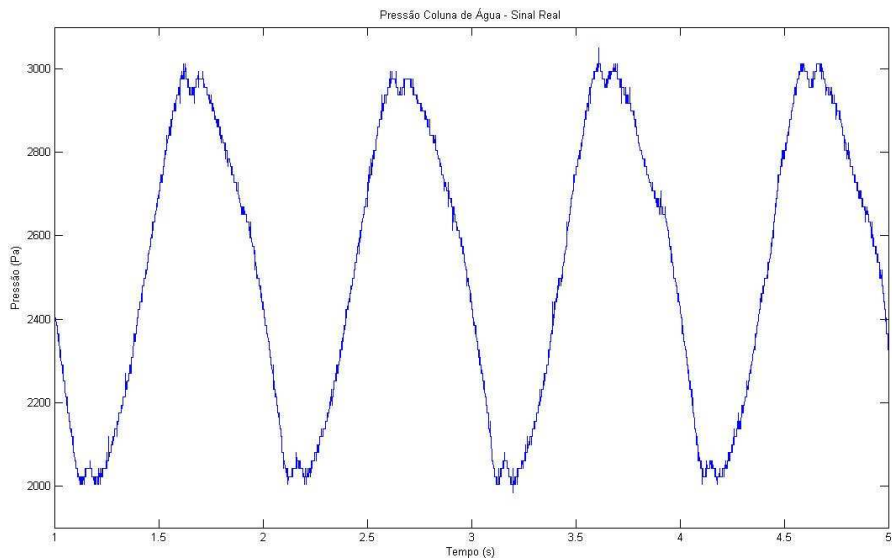
Figura 5.15: Sinal real da pressão na CAO

Na Figura 5.15 podem identificar-se zonas distintas afectadas pela abertura e fecho das válvulas, em especial a abertura das válvulas do reservatório B. Após cada máximo verifica-se uma flutuação durante a descida da pressão. O mesmo tipo de flutuação existe após cada mínimo, embora seja muito mais ténue que a anterior. As oscilações verificadas nos mínimos e máximos dos sinais devem-se à recirculação de fluido existente devido à rápida desaceleração do modelo. Este fenómeno não foi contabilizado antes e mais à frente será explicada a sua influência na pressão dos reservatórios.

O efeito da abertura das válvulas é importante de considerar quando se fizer a análise entre as pressões na CAO e nos reservatórios, sendo essa a principal razão de se utilizar o sinal real em vez do sinal tratado. Como se pode observar na Figura 5.4 o tratamento do sinal com a transformada de Fourier elimina por completo o efeito da abertura de válvulas e da recirculação, o que iria provocar uma análise errada dos sinais combinados.

A tabela 5.2 apresenta ainda o valor médio e a amplitude da variação da pressão na CAO. Estes valores serão posteriormente utilizados na comparação para um aparelho à escala real.

	Pressão (Pa)
Média	2532
Amplitude	555

Tabela 4.2: Valores relevantes da pressão na CAO

5.4.3 Variação com a Frequência

Anteriormente analisou-se a variação da pressão na base da CAO para quatro frequências específicas, embora se tenham retirado valores para outras, para não gerar confusão com excesso de curvas na análise dos gráficos. Na Figura 5.16 apresentam-se agora os valores máximos de pressão atingidos para todas as frequências testadas nos ensaios para ondas de 10 cm. De notar que estes máximos foram obtidos após o tratamento com FFT que permitiu a eliminação dos patamares de pressão existentes nessas zonas. Adicionalmente calculou-se uma função de regressão a estes pontos para as diferentes frequências. Esta função contabiliza os diferentes amortecimentos do modelo para as diferentes frequências, isto é, a variação de pressão observada na figura não se deve unicamente às frequências, mas tem também influência dos diferentes deslocamentos do modelo.
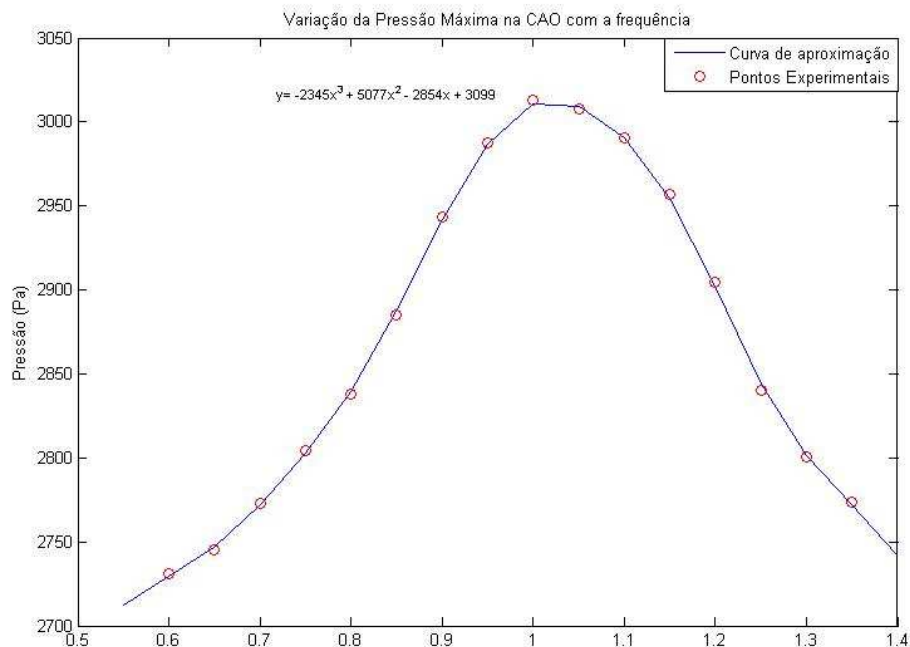
Figura 5.16: Variação da Pressão Máxima na CAO com a frequência para onda de 10 cm

Os resultados observados na figura comprovam a evolução analisada na escolha do melhor estado de mar para a criação de diferença de pressão. A pressão máxima atinge-se para 1 Hz, ainda que o deslocamento máximo seja a 0.8 Hz.

5.4.4 Pressão na CAO e nos reservatórios A e B

No texto anterior referiu-se a importância de saber em que instante abrem as válvulas na análise das três pressões em conjunto. Da Figura 5.17 pode observar-se que os máximos de pressão nos reservatórios não coincidem com os máximos da pressão na coluna de água, embora os furos de ligação da CAO ao reservatório A sejam sobredimensionados. Verifica-se assim que o efeito da recirculação ajuda a aumentar a pressão no reservatório A, mas pela negativa impede que a pressão no reservatório B desça até ao mínimo da pressão da CAO.

Devido à também sobredimensionada ligação entre reservatórios verifica-se que o máximo de pressão em B se dá praticamente no mesmo instante que em A. Seria de esperar que existisse uma desfasagem entre os máximos destes dois sinais.

É agora claramente visível a zona onde as válvulas do reservatório B abrem, situando-se esse momento no cruzamento do sinal de pressão da CAO com o do reservatório B junto aos máximos. Como se pode observar a pressão em B começa a reduzir nessa altura sendo no entanto sempre superior à da coluna de água.

Junto aos mínimos dos sinais verifica-se que a diferença da CAO para os reservatórios se acentua. À partida este resultado seria esperado apenas para o reservatório A, mas ao se compreender a influência da recirculação pode explicar-se porque se verifica esta diferença também para o reservatório B. No movimento descendente o primeiro efeito da recirculação é contrariar o caudal a sair de B para a coluna de água, fazendo com que a pressão no reservatório não desça tanto quanto seria esperado.
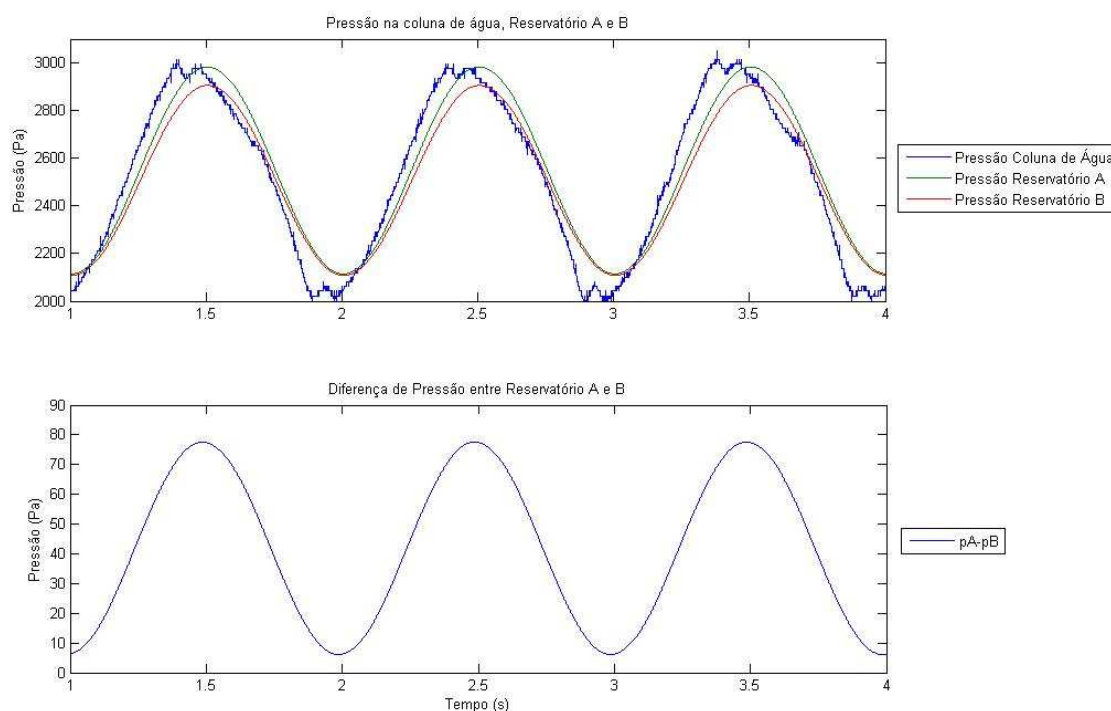
Figura 5.17: Comparação da pressão na CAO e nos reservatórios A e B

Analisando os dois gráficos da Figura 5.17 em conjunto verifica-se que a maior diferença de pressão entre os reservatórios se dá para as maiores pressões atingidas. Este resultado confirma as expectativas prévias aos ensaios devido ao diâmetro dos furos entre câmaras. Como os furos entre a CAO e o reservatório A são de dimensão superior aos entre A e B a pressão sobe mais rapidamente em A que em B. Caso fossem dimensões semelhantes esperar-se-ia que a diferença entre pressões fosse muito mais reduzida. Estes resultados permitem concluir que a relação destes diâmetros deve ser tanto maior quanto possível para maximizar a diferença de pressão obtida entre reservatórios.

5.4.5 Diferença de Pressão entre Reservatório A e CAO

Esta diferença é aqui analisada para se perceber qual o efeito dos furos das válvulas na passagem de pressão da CAO para o reservatório. Na altura de concepção do modelo admitiu-se um valor de 0.8 para a relação $\frac{p_A}{p_2}$, em que p_A e p_2 são respectivamente a pressão no reservatório *A* e na base da coluna de água, sendo este quociente considerado constante. No entanto, pela observação das evoluções das pressões nas duas câmaras percebe-se que este valor não será constante, pelo que interessa saber qual o seu mínimo, uma vez que será nessa situação que se terá a maior diferença de pressão entre a coluna de água e o reservatório A e consequentemente o maior caudal da CAO para A.
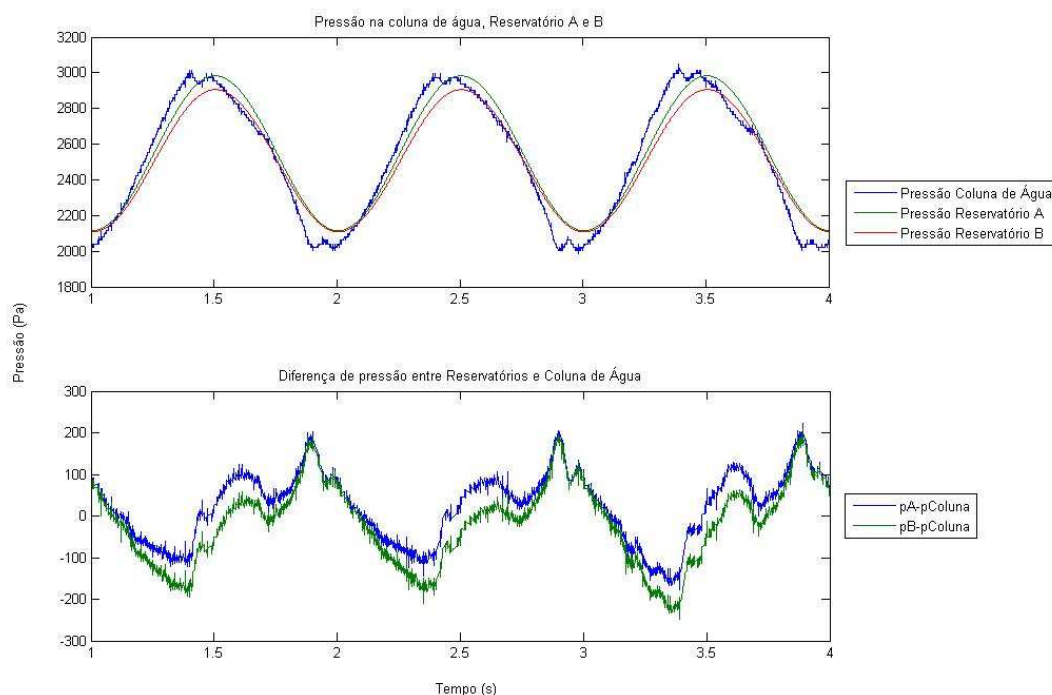
Figura 5.18: Diferença de pressão entre Reservatórios e a CAO

Na Figura 5.18, em baixo, pode identificar-se explicitamente o momento de abertura das válvulas: a inversão da evolução das curvas. Fica também patente a regularidade dos sinais com as várias ondas assim como o caudal demasiado elevado entre reservatórios, que leva a pressões iguais nos dois reservatórios em determinadas zonas da onda.

Por outro lado é também facilmente visível a irregularidade da diferença analisada e consequentemente a irregularidade da relação $\frac{p_A}{p_2}$. Uma vez que quando a pressão em A é superior as válvulas estão fechadas tem-se que não existe passagem de caudal nessas alturas. Na Figura 5.19 pode verificar-se mais detalhadamente a razão $a = \frac{p_A}{p_2}$ quando existe caudal.
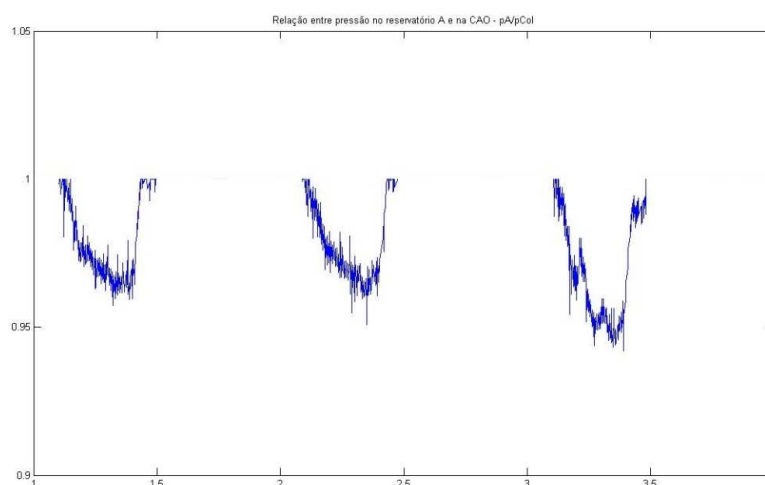
Figura 5.19: Relação $a = \frac{p_A}{p_2}$ quando à passagem de caudal

Fica patente que o valor adoptado nos cálculos iniciais para a concepção do modelo foram inferiores aos reais. Esta diferença do projecto para a prática deve-se ao facto de se ter sobredimensionado os furos das válvulas e se ter fechado um dos furos na divisória entre reservatórios. Estas alterações levam a que a pressão em A possa atingir valores mais elevados e mais rapidamente. Como se concluiu anteriormente a razão entre os dois diâmetros dos furos (da CAO para A e de A para B) deve ser a maior possível para que se atinjam maiores diferenças de pressão, e o diâmetro da passagem entre A e B deve ele também ser suficiente para que permita a passagem de caudal em grande quantidade. Notar aqui também o efeito da recirculação na coluna de água que ajuda à passagem de pressão para o reservatório A, aumentando desse modo os valores de *a*. Este efeito tem de ser testado num aparelho de maior escala de modo a se perceber que tem as mesmas consequências.

5.4.6 Caudal e Potência

A esta escala e com a influência da área reduzida definida para a passagem do reservatório A para o B tem-se que os valores atingidos de caudal são da ordem dos centilitros por segundo (1×10^{-5} m^3/s). Estes são valores muito reduzidos e os volumes que são movidos são ainda inferiores devido aos períodos de tempo testados serem inferiores a 1 segundo.
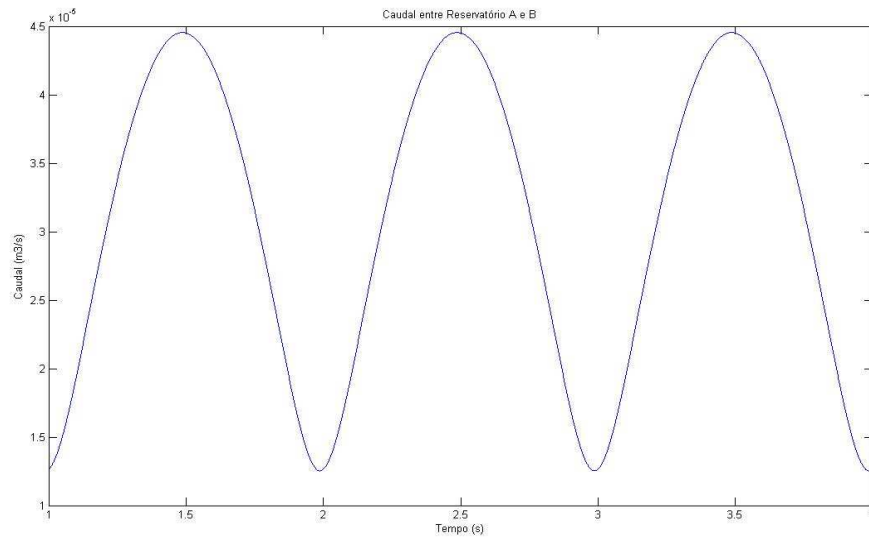
Figura 5.20: Aproximação do Caudal entre Reservatório A e B

De notar que o caudal aqui apresentado é calculado ponto a ponto através da velocidade obtida da equação de Bernoulli e da área do furo.

$$Q_{A\to B} = A_t \times \sqrt{\frac{2.(p_A - p_B)}{\rho}} \times C_{des} \quad (5.1)$$

A expressão 5.1 mostra que o caudal depende directamente da área das válvulas e da raiz quadrada da diferença de pressão, reforçando a razão para os pequenos caudais registados. Depende também do coeficiente de descarga, C_{des}, que devido a se ter sobredimensionado a ligação entre os reservatórios se assume unitário. Mais à frente será feita uma comparação com o esperado à escala real.

A potência que seria debitada por este modelo é então muito afectada pelos valores de caudal obtidos andando apenas em torno das milésimas de *Watt*, sendo o valor máximo calculado de 3,5 mW. No entanto, a esta escala não se pode ter a noção da viabilidade que um

aparelho destes poderia ter, pelo que de seguida se tentará fazer uma comparação para a escala real.

5.5 Comparação entre escalas

Para se puder comparar as duas escalas utilizou-se o modelo teórico como base. Primeiro avalia-se o modelo teórico à escala do modelo com os resultados obtidos para este e em seguida altera-se o modelo teórico para calcular à escala real. Obviamente que existirão diferenças devido aos efeitos observados, às quantidades de água que se deslocam e até à diferente inércia. Estas diferenças são consideradas sendo feita uma reflexão do que se espera que aconteça à escala real.

5.5.1 Escala do Modelo

A comparação deve começar por ser feita ao nível das pressões atingidas na coluna de água. Utilizaram-se as medidas geométricas do modelo experimental assim como as condições da onda no modelo teórico para que a comparação seja mais fiel (f = 1.0 Hz, A = 10 cm, L = 12,5 cm). A expressão 5.1 foi a utilizada no cálculo teórico da pressão na coluna de água.

$$p_2 = \rho g A_1 \frac{\omega^2 L}{g} \cos \omega t \tag{5.2}$$
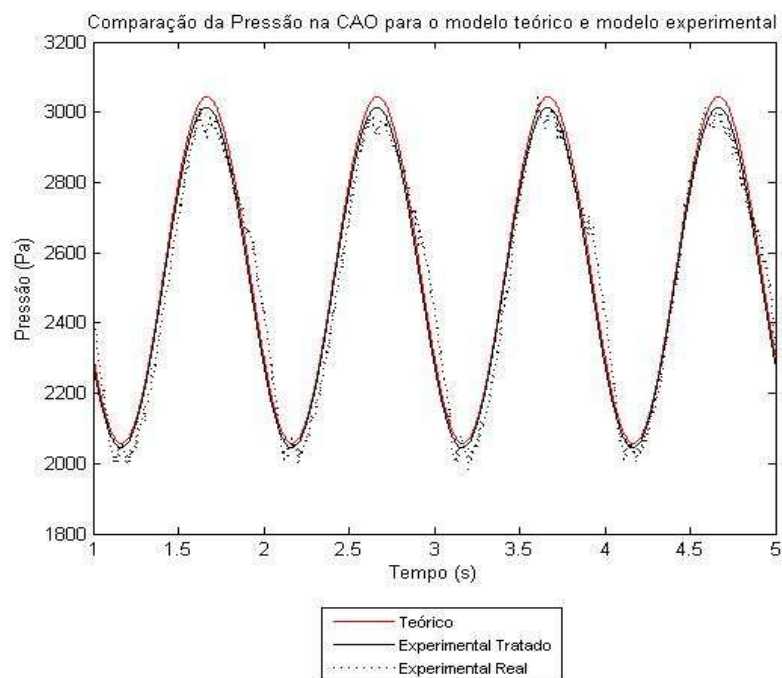
Figura 5.21: Comparação da pressão da CAO obtida experimentalmente e teoricamente para a onda de 10 cm e 1.0 Hz

Verifica-se pela análise da Figura 5.21 que o modelo teórico da pressão na CAO é muito preciso relativamente ao experimental. Deste modo e utilizando o valor de $a = 0{,}94$ (mínimo obtido experimentalmente) obtém-se o valor teórico para a pressão em A. Note-se que num aparelho à escala real o período de tempo para a passagem de água da CAO para o reservatório A é cerca de 8 a 10 vezes superior ao registado para o modelo experimental.
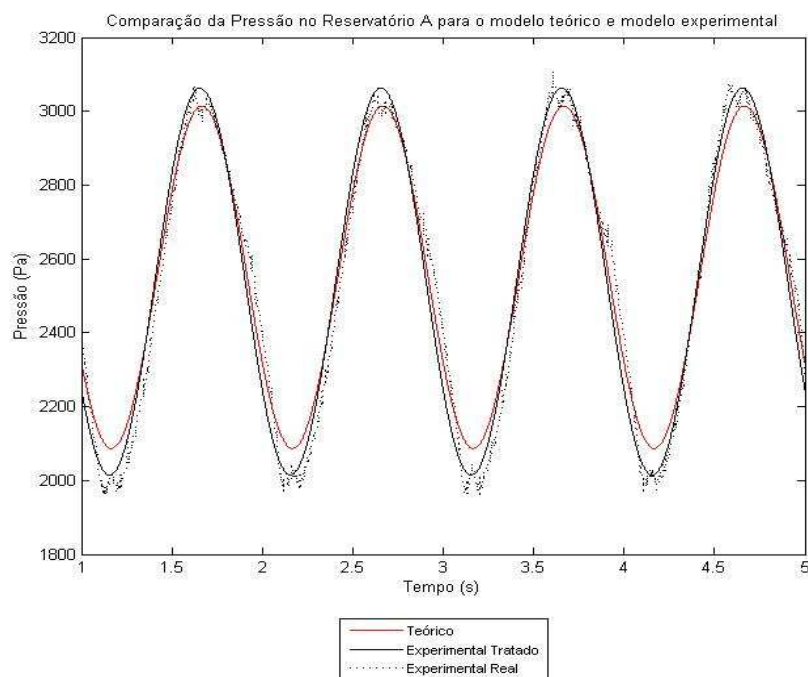
Figura 5.22: Comparação da pressão do Reservatório A obtida experimentalmente e teoricamente

Uma vez que se utilizou o valor mínimo de *a* tem-se que as pressões atingidas no modelo teórico são mais reduzidas, fazendo assim do modelo conservador relativamente à realidade. A mesma análise foi feita para a pressão no reservatório B com as mesmas conclusões.

Desta forma tem-se que à escala do modelo experimental as diferenças entre este e o modelo teórico são mínimas com prejuízo para o teórico. Sendo assim calcula-se de seguida o modelo para dimensões reais.

5.5.2 Teórico à Escala real

Antes de se entrar nos valores obtidos é necessário fazer considerações devido à diferença de escala do modelo e às diferenças das características das ondas.

Relativamente às ondas tem-se que à escala real a sua frequência é normalmente muito inferior (tipicamente períodos de 8 a 12s) e que a sua altura de onda se situa normalmente em

torno dos 3 metros. Quanto ao modelo, as características relevantes a considerar são a profundidade do modelo na zona dos reservatórios, z_2, e o comprimento desde a abertura do modelo até à superfície livre dentro dos reservatórios, *L*. Tendo em conta a relação de escalas entre as alturas de onda (30x) tem-se que os valores das medidas geométricas utilizadas para esta análise foram $z_2 = 7.8m$ e L = 3.75m. De notar que, para que esta análise se possa fazer, todas as dimensões relativas ao modelo têm de manter a relação entre si utilizada no modelo. Observe-se também que estas medidas geométricas resultam em aparelhos pequenos não demonstrando o potencial que um aparelho de outras dimensões poderá ter. Este facto deve-se às alturas de onda utilizadas serem relativamente grandes comparativamente com o tamanho do modelo em si. Para se puder fazer uma análise para aparelhos a uma escala ainda maior é necessário testar o modelo para ondas com menor amplitude.

Como se descreveu na secção de Fundamentos Teóricos a pressão devido à desaceleração da CAO depende fundamentalmente da frequência da onda ao quadrado e de *L*. Relativamente ao modelo experimental utilizado a frequência ao quadrado diminui aproximadamente 100 vezes, enquanto o comprimento *L* aumenta cerca de 30 vezes. Outro factor que também deixa antever maiores diferenciais de pressão é a maior amplitude das ondas, que aumenta cerca de 30 vezes.
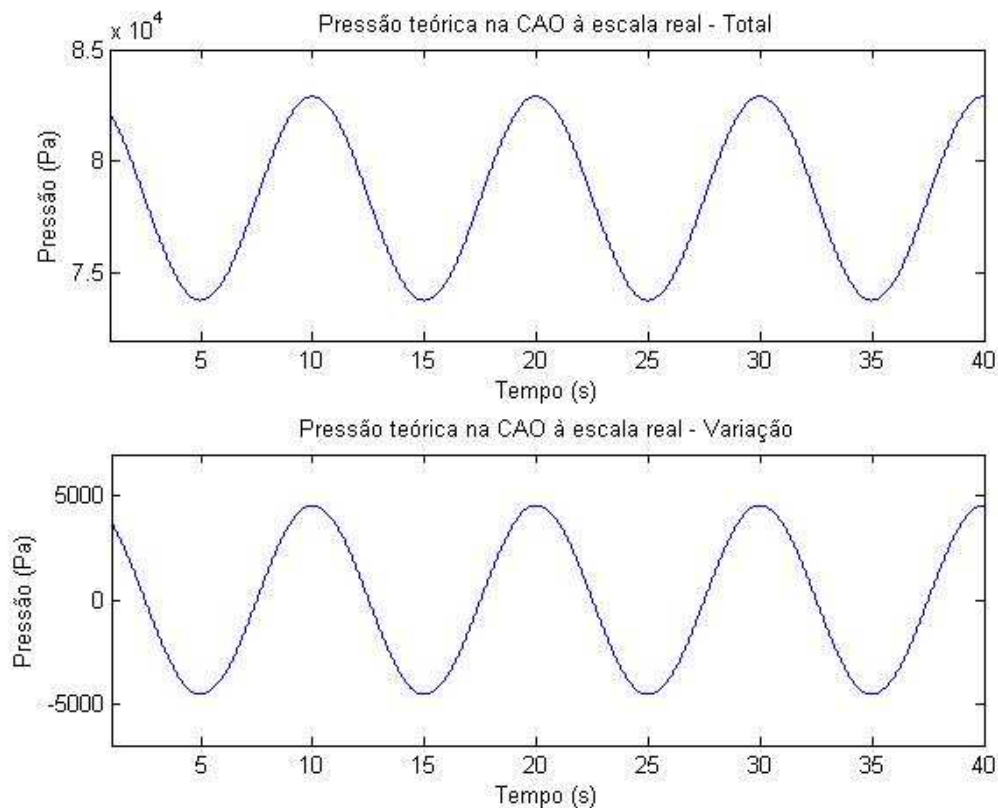
Figura 5.23: Pressão teórica na CAO à escala real

Como se pode observar na Figura 5.23 a pressão atingida na coluna de água (relativa à pressão atmosférica) atinge cerca de 8,3 x 10^4 Pa ($\sim 0.8\ bar$) e a sua variação de amplitude os ~5 x 10^3 Pa. A tabela 5.3 faz a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos pelo modelo teórico para a escala real.

	Pressão (Pa) Escala Modelo Experimental	Pressão (Pa) Escala Real	Aumento
Média	2532	78347	~31x
Amplitude	555	4958	~9x

Tabela 5.3: Comparação da pressão da CAO entre as diferentes escalas

O aumento da média resulta da maior profundidade dos reservatórios, enquanto o da amplitude vem da análise da expressão 5.2 com as relações apresentadas anteriormente para as medidas geométricas.

$$\left(\rho g A_1 \frac{\omega^2 L}{g} \cos \omega t\right)_{real} = \left(\rho g.\left(30 x A_{1_{modelo}}\right) \frac{\left({\omega^2}_{modelo}/_{100}\right).\left(30 x L_{modelo}\right)}{g} \cos \omega t\right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \left(\rho g A_1 \frac{\omega^2 L}{g} \cos \omega t\right)_{real} \approx 9x \left(\rho g A_1 \frac{\omega^2 L}{g} \cos \omega t\right)_{modelo} \quad (5.3)$$

Para se estimar o valor da diferença de pressão entre reservatórios recorre-se à análise feita para o modelo desta mesma diferença. Adimensionaliza-se a diferença de pressão obtida experimentalmente com a pressão da coluna de água, uma vez que esta afecta os dois reservatórios.
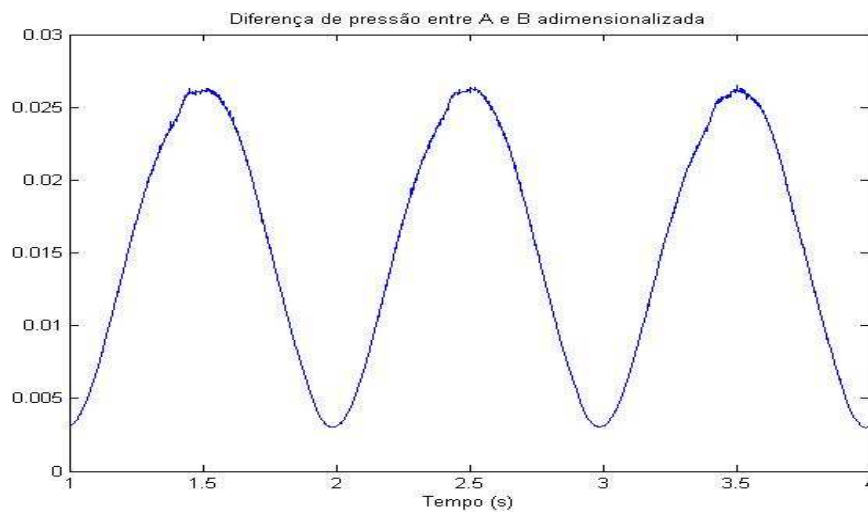
Figura 5.24: Diferença de pressão adimensionalizada

Aplica-se esta adimensionalização ao modelo teórico à escala real e obtém-se assim uma estimativa das diferenças de pressão obtidas.
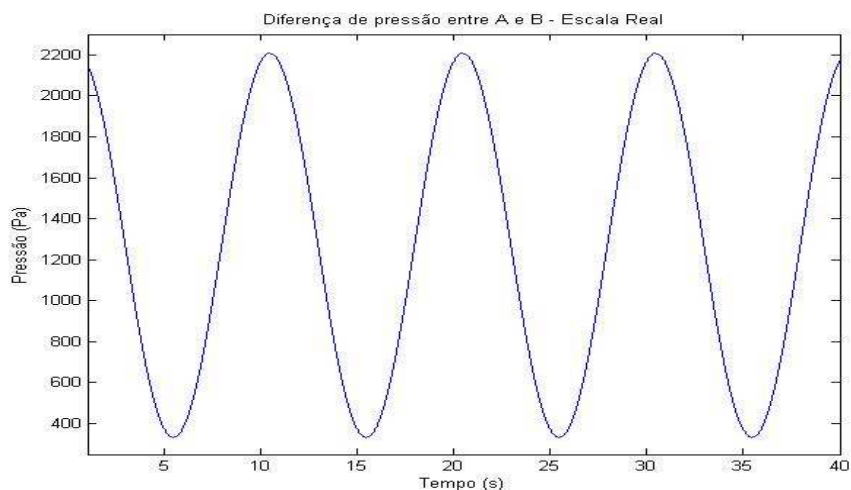
Figura 5.25: Diferença de pressão entre A e B estimada para um aparelho à escala real

Na Figura 5.25 verifica-se que a relação entre a diferença máxima e a mínima é cerca de 6,7 vezes a pressão mínima, enquanto que para o modelo experimental esta era de 8. Esta diferença pode dever-se ao método de adimensionalização ou a algumas diferenças dinâmicas devido à diferente escala. Outra adimensionalização possível seria utilizando a variação de amplitudes da pressão da CAO.

O caudal a calcular depende ainda da área do furo entre os reservatórios. Uma vez que as medidas do modelo estão praticamente todas a uma escala de 30 para um aparelho real utiliza-se um diâmetro com essa razão neste cálculo (d=0,36 m). A área de passagem é então 0,102 m^2.
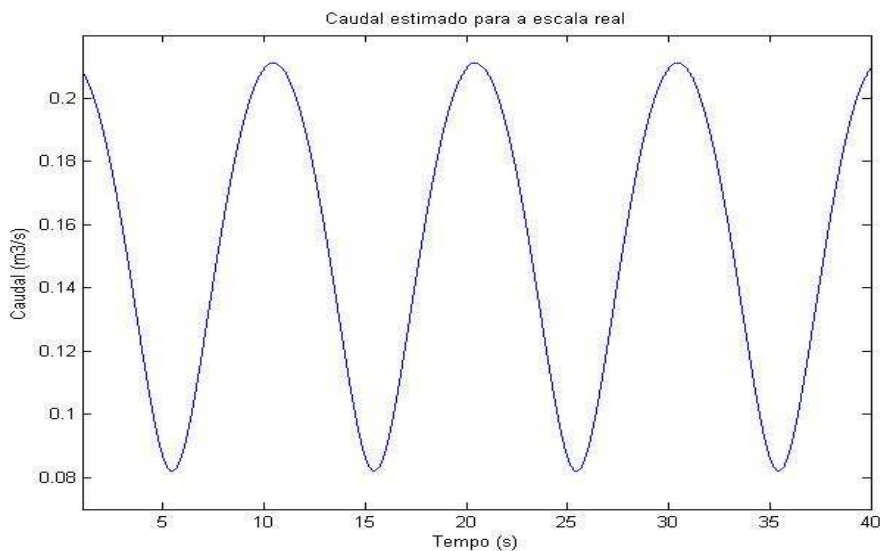
Figura 5.26: Caudal estimado entre reservatórios para um aparelho real

A Figura 5.26 mostra que a variação de caudal é considerável o que exige um estudo pormenorizado relativamente à quantidade de turbinas a utilizar e ao tipo de controlo a ter. De notar que a área de passagem pode ser dividida em várias o que permite controlar individualmente quantas passagens estão abertas. Este controlo pode ser de muita importância para controlar a potência debitada consoante o estado das ondas.

Para a obtenção destes caudais é fundamental garantir que a pressão atingida nos reservatórios é a calculada, pelo que é necessário ter a mesma relação entre as áreas dos furos das divisórias que o utilizado no modelo experimental. A relação no modelo é de 8,68 (considerando que um dos furos entre os dois reservatórios estava fechado), pelo que a área dos furos entre a CAO e os reservatórios terá de ser aproximadamente 0,885 m^2. Esta área também poderá ser dividida em várias entradas.

Com os caudais calculados pode então, finalmente, estimar-se a potência que um aparelho à escala real debitaria.
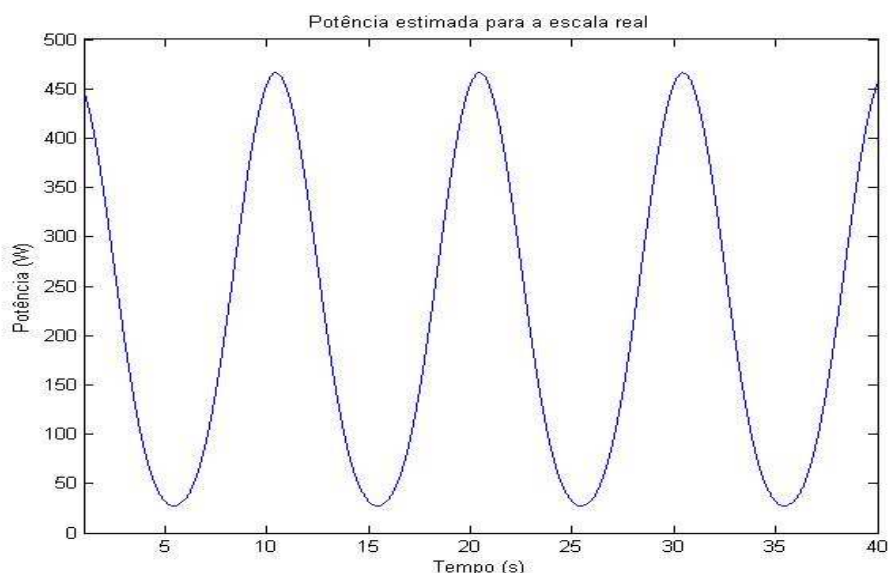
Figura 5.27: Potência estimada de um aparelho à escala real

Tem-se então que um aparelho apenas a utilizar pressão obtida pela desaceleração da coluna de água pode atingir picos de potência de ~467 W, produzindo em média ~267 W. Como referido ao longo de toda esta análise, estes valores são estimativas para uma escala ainda inferior à correntemente utilizada noutros dispositivos. É de esperar que com o aumento da profundidade dos reservatórios, ou seja, com o aumento de L e z_2 se atinjam valores de potência mais elevados. Assim, estima-se que aparelhos para a exploração do efeito de inércia da coluna de água à escala real possam atingir as dezenas de kW se atingirem profundidades a rondar os 40/50 metros.

Além disso o atrito entre a bóia e o guiamento não foi considerado pelo que é provável que se consigam obter potências mais elevadas.

Capítulo 6

6 Conclusões

Neste trabalho verificou-se o potencial da absorção de energia das ondas que utiliza a inércia da coluna de água oscilante para alimentar dois reservatórios interligados, um de alta e outro de baixa pressão, originando um escoamento unidireccional entre ambos.

O desenvolvimento de um modelo completamente novo levou à existência de situações de difícil resolução, acabando por criar várias aproximações que poderão no futuro ser evitadas. A escala global do modelo e as baixas pressões envolvidas impediram o uso de válvulas calibradas e a medição directa dos caudais envolvidos. De modo a poder calcular uma aproximação dos caudais nas diferentes passagens foi necessário condicionar geometricamente a concepção do modelo, especificamente da área dos furos de ligação entre câmaras que foram feitos com dimensão muito superior ao necessário. Ainda assim obtiveram-se resultados com explicação lógica e coerentes, quanto às pressões que se podem atingir nos reservatórios de alta e baixa pressão e ao caudal entre ambos e, portanto, à extracção de energia. O modelo desenvolvido pode ser melhorado a nível de instrumentação utilizada, ao nível das ligações entre câmaras e do atrito entre a bóia e o sistema de guiamento vertical (que não foi quantificado), mas cumpriu os objectivos propostos para esta dissertação.

Com este trabalho verificou-se que o diâmetro interior da bóia superior do modelo produz efeito na desaceleração da coluna de água. Confirmou-se, no entanto, que a geometria mais estável e com melhores respostas para uma maior gama de estados do mar é a geometria original, em que o diâmetro interior da bóia, e, portanto, a secção da coluna de água, são uniformes. Avaliam-se as respostas para várias frequências e amplitudes, confirmando-se as evoluções esperadas. A inclusão de discos na zona inferior da bóia, cuja consequência é reduzir a secção transversal da coluna de água nessa zona, aumenta a amplitude das pressões atingidas, tendo um efeito positivo para frequências e amplitudes elevadas e negativo para as restantes. Geometrias que aumentem a massa do dispositivo a ponto de constrangerem a amplitude das oscilações têm um efeito negativo na pressão obtida. Verificou-se que para frequências mais elevadas o amortecimento do modelo aumenta rapidamente. Para o efeito desta dissertação, elegeu-se uma geometria que se considerou como óptima, embora não seja absolutamente seguro que não seja possível encontrar geometrias melhores com mais trabalho de pesquisa.

Nos ensaios para a melhor geometria encontrada pôde verificar-se a influência da recirculação do fluido na base da CAO, favorecendo numa primeira instância o aumento de pressão em A e contrariando a saída de fluido de B, no momento da abertura da válvula, e consequentemente a queda de pressão neste reservatório. Confirmou-se que a utilização de áreas superiores às necessárias (nas ligações das câmaras) em conjunto com a recirculação

permitem um maior aumento da pressão nos reservatórios do que ocorreria caso os furos não fossem sobredimensionados. Conseguiu-se criar diferenças de pressão consideráveis entre os dois reservatórios, cerca de 14% da variação de pressão na CAO, para a escala do modelo utilizado. Verifica-se, como esperado, que a saída de fluido do reservatório B não intensifica a diferença de pressão, mas prolonga-a por mais tempo. Os caudais movidos no modelo experimental são muito reduzidos, na ordem dos centilitros.

A comparação dos resultados do modelo com a teoria demonstrou que a esta escala o erro entre os dois é pequeno. Face a esta demonstração realizaram-se cálculos a partir do modelo teórico para estimar os valores num modelo à escala real a uma profundidade de aproximadamente 8 metros. É impossível prever o efeito da recirculação do fluido na base da CAO num aparelho a uma escala maior, apenas com recurso aos ensaios feitos, e se o seu impacto aumenta com o aumento da escala. Utilizaram-se as relações obtidas para o modelo experimental para estimar os valores do aparelho à escala real, assumindo variações idênticas. Sempre que possível efectuaram-se as aproximações por defeito de modo a não sobrestimar o potencial da inércia da CAO. Embora correndo o risco de se ter estimado os valores por defeito obtiveram-se valores médios de potência de 267 W com picos entre 20 e 467 W. Estes valores indicam que a desaceleração da coluna de água de forma independente fica aquém das tecnologias emergentes, mas que este efeito merece ser aprofundado a uma escala e detalhe maior. No entanto estima-se já que este efeito pode ser utilizado em aparelhos de média potência e fica ainda em aberto a possibilidade de combinação com outros efeitos como a variação hidrostática ou a incorporação de um PTO de turbinas de ar no topo da coluna de água.

Verificou-se ainda que para as dimensões de um aparelho real o efeito da desaceleração toma uma componente mais importante que o efeito por variações hidrostáticas levando a crer que a combinação destes dois efeitos pode ter potencial para extrair potências muito mais elevadas.

Quanto a problemas identificados o mais preocupante é relativo ao tamanho e resposta das válvulas. Calculou-se que a área das válvulas seria perto de 1 m^2 o que significaria um raio de 0,56 m. O lado positivo é que a área pode ser decomposta em várias utilizando-se também várias válvulas.

6.1 Recomendações

Após a realização deste trabalho surgiram várias ideias quanto ao desenvolvimento do estudo da inércia da coluna de água.

A ideia principal a seguir é o envolvimento do efeito comprovado nesta dissertação com a variação de pressão hidrostática. Para tal é necessária a criação de um modelo que consiga

oscilar em oposição de fase à onda. O modelo desenvolvido no decorrer desta tese não pode ser aproveitado para o teste sugerido devido à sua alta flutuabilidade que o impede de oscilar na frequência requerida. Deve também utilizar-se alturas de onda que permitam a extrapolação para medidas geométricas superiores.

Sugere-se também o estudo do aproveitamento do PTO com turbinas de ar usual nos modelos de OWC oscilantes. Para este caso pode fazer-se uma adaptação do modelo desta tese ao modelo utilizado na tese de Tiago Kullberg Martins, sendo que não é necessária a criação de nenhuma peça para este efeito devido à compatibilidade já existente entre os dois modelos.

Finalmente aconselha-se fortemente o desenvolvimento de testes sobre a desaceleração da CAO a escalas maiores para confirmar a sua crescente influência e os valores estimados no decorrer desta dissertação. Caso se siga esta via de desenvolvimento devem ser testadas várias relações entre os diâmetros das ligações das câmaras de modo a se optimizar as diferenças de pressão atingidas.

7 Referências Bibliográficas

[1] Vining, J. G., & Muetze, A. (2009). *Economic Factors and Incentives for Ocean Wave Energy Conversion.*

[2] *Wave Energy*. (n.d.). Retrieved 2010, from http://www.wavesenergy.com.

[3] Wikipedia. (2010). *Wave Power*. Retrieved 2010, from http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power.

[4] L. Margheritini, D. V. (2009). SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy* , 1371-1380.

[5] Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures* , 185-201.

[6] J. M. B. P. Cruz, A. J. N. A. Sarmento. Energia das ondas. Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.

[7] REUTERS, D. F. (2010). *Ondas do mar poderão fornecer energia à Austrália--cientistas*. Retrieved 2010, from http://www.estadao.com.br/noticias/vidae,ondas-do-mar-poderao-fornecer-energia-a-australia-cientistas,596323,0.htm.

[8] Zhang, D., Li, W., & Lin, Y. (2009). *Wave energy in China: Current status and perspectives.*

[9] Minerals Management Service, U.S. Department of the Interior. (2006). *Wave Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf.*

[10] Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., et al. (2002). *Wave energy in Europe: current status and perspectives.*

[11] Al-Habaibeh, A., Su, D., McCague, J., & Knight, A. (2010). *An innovative approach for energy generation from waves.*

[12] WaveRoller. (2010). *Harnessing the Blue Energy*. Retrieved 2010, from http://www.aw-energy.com/index.html.

[13] Thorpe, T. (1999). *An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs.*

[14] Ocean Power Technologies. (2010). *Technology Comparison*. Retrieved 2010, from http://www.oceanpowertechnologies.com/compare.htm.

[15] Laurance, B. (2008, Agosto 3). Tide turns for wave power. *The Sunday Times* .

[16] Pelamis Wave Power. (2010). Retrieved 2010, from http://www.pelamiswave.com.

[17] Robert Currie, B. E. (2002, May). *Wave Power*. Retrieved 2010, from http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/01-02/RE_info/wave%20power.htm

[18] Darvill, A. (2010, Julho). *Energy Resources: Wave power*. Retrieved Setembro 2010, from http://www.darvill.clara.net/altenerg/wave.htm.

[19] Olivia Langhamer, K. H. (2010). Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1329-1335.

[20] Ocean Energy Council. (2009). *Wave Energy*. Retrieved 2010, from http://www.oceanenergycouncil.com/index.php/Wave-Energy/Wave-Energy.html

[21] Solarbuzz. (2010). *Solar Energy Costs/Prices*. Retrieved 2010, from http://www.solarbuzz.com/StatsCosts.htm.

[22] American Wind Energy Association. (2010). *Resources*. Retrieved 2010, from http://www.awea.org/faq/wwt_costs.html.

[23] Falcão, A. F. (2009). *Wave energy utilization: A review of the technologies.*

[24] Fraser, J. (2006, November). *The Energy Blog*. Retrieved 2010, from http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/11/sde_wave_power_.html.

[25] Checkmate Seaenergy Limited. (2010). Retrieved 2010, from http://www.checkmateuk.com/seaenergy/introduction.html.

[26] Ocean Navitas. (2007). *Ocean Navitas - Renewable Energy Technology*. Retrieved 2010, from http://oceannavitas.com/index.html

[27] Wikipedia. (2007). *CETO Wave Power*. Retrieved 2010, from http://en.wikipedia.org/wiki/CETO_Wave_Power.

[28] Carnegie. (2010). Retrieved 2010, from Carnegie Wave Energy: http://www.carnegiewave.com/

[29] Falcão, A. F. O., *Ocean Energy, Renewable Energy,* Instituto Superior Técnico, 2008

Anexos

Apêndice A

Descrição das Peças do Modelo já existente

Peça 2 – Tubo de auxílio ao guiamento

Uma das condições para os testes era que o modelo apenas oscilasse verticalmente. Para esse efeito foi criado um guiamento através de uma haste metálica segura ao canal de ondas e de um tubo solidário com o modelo no interior do qual a haste se desloca. A haste é calibrada e apenas toca em dois apoios, de baixo atrito, situados internamente no topo e fundo do tubo. O tubo permite também fechar o fundo da coluna de água, mantendo o guiamento. Possui várias ranhuras para a fixação de outras peças do modelo ao tubo.
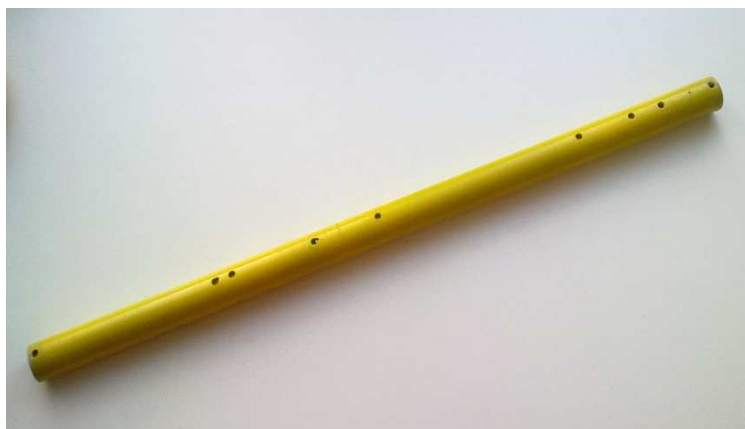
Figura A.1: Tubo de auxílio ao guiamento

Peça 4.4 – Superfície interior da bóia superior

De forma a que o modelo flutuasse na água criou-se uma câmara de ar na bóia superior. Esta peça limita interiormente essa câmara de ar, sendo fixa à peça 7, que delimita a câmara exteriormente. Em termos de concepção é apenas um pequeno cilindro fino de acrílico.

Peça 7 – Superfície exterior da bóia superior

Como atrás foi referido delimita a câmara de ar exteriormente e permite a ligação ao resto do corpo do modelo. A forma cónica da peça é consequência dos efeitos pretendidos na radiação de ondas em modelos deste tipo e para não provocar uma perda de carga demasiado grande no deslocamento na água.

Figura A.2: Conjunto Peça 4.4 e Peça 7

Peça 9 – Corpo do modelo

Trata-se de uma peça tubular com a função de aumentar a coluna de água na zona inferior do modelo. A teoria deste modelo diz que quanto maior a coluna de água for maior será a pressão devido à inércia desta.

Peças 9.1 e 9.2 – Ligação corpo-tubo guiamento

A funcionalidade destas peças é a mesma: garantir a ligação do corpo do modelo ao tubo de guiamento. O facto de não serem peças iguais deve-se a constrangimentos no modelo da tese referida. Para este trabalho poderiam ser adoptadas duas peças idênticas, tendo em consideração a criação de furos devidamente localizados no tubo de guiamento para o encaixe entre as peças.
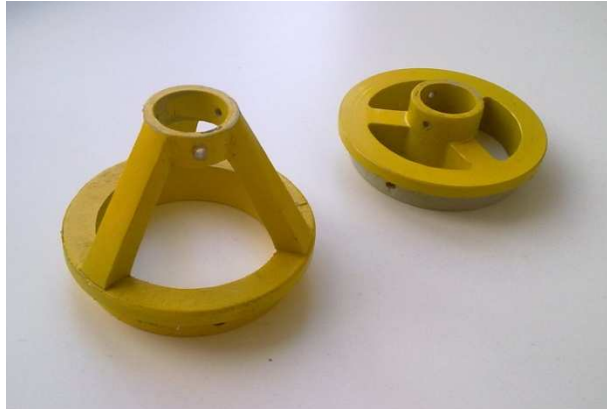
Figura A.3: Peças de ligação do modelo ao tubo de guiamento. (a) Ligação Superior. (b) Ligação Inferior

Todas as peças aqui apresentadas, à excepção da 4.4 e 7, foram fabricadas em polipropileno devido ao peso total do modelo. As excepções foram criadas em acrílico devido à complexidade de o fazer em polipropileno e ao custo inerente.

Apêndice B

Programa de LabView
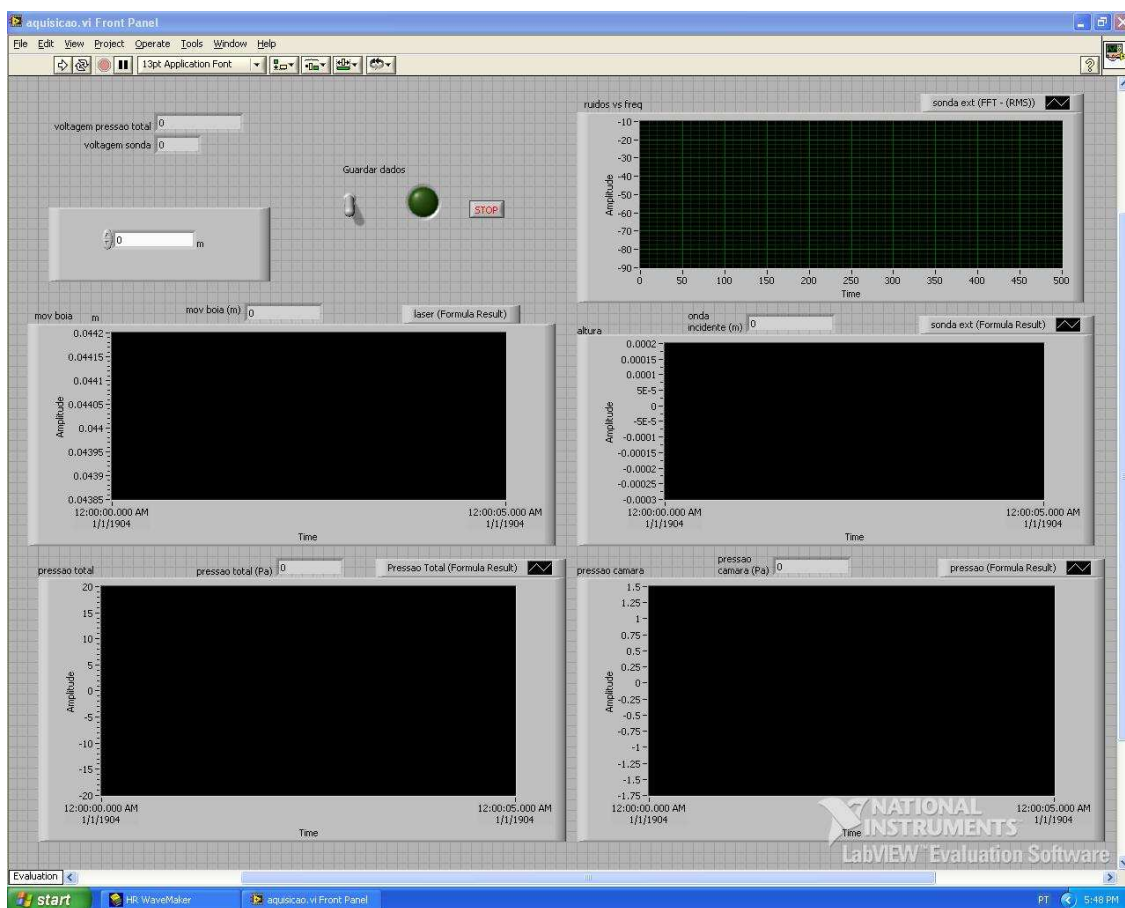
Figura B.1: Painel frontal do programa em LabView

Neste painel podem ver-se cinco janelas para a apresentação em tempo real de sinais. A superior direita registava os valores do ruído para se puder controlar quando algum sensor estivesse com algum problema. As restantes apresentavam os sinais do deslocamento da bóia, altura da onda incidente, pressão lida pelo manómetro e diferença de pressão lida pelo GE Druck. Junto de cada janela existe também uma caixa com o valor instantâneo do sinal.

Na zona superior esquerda existem duas caixas de apresentação do valor de voltagem, utilizados para a calibração dos sensores, assim como uma caixa de controlo do zero do sensor laser. Está também disponível uma interface para guardar os dados em ficheiro e para parar as leituras.
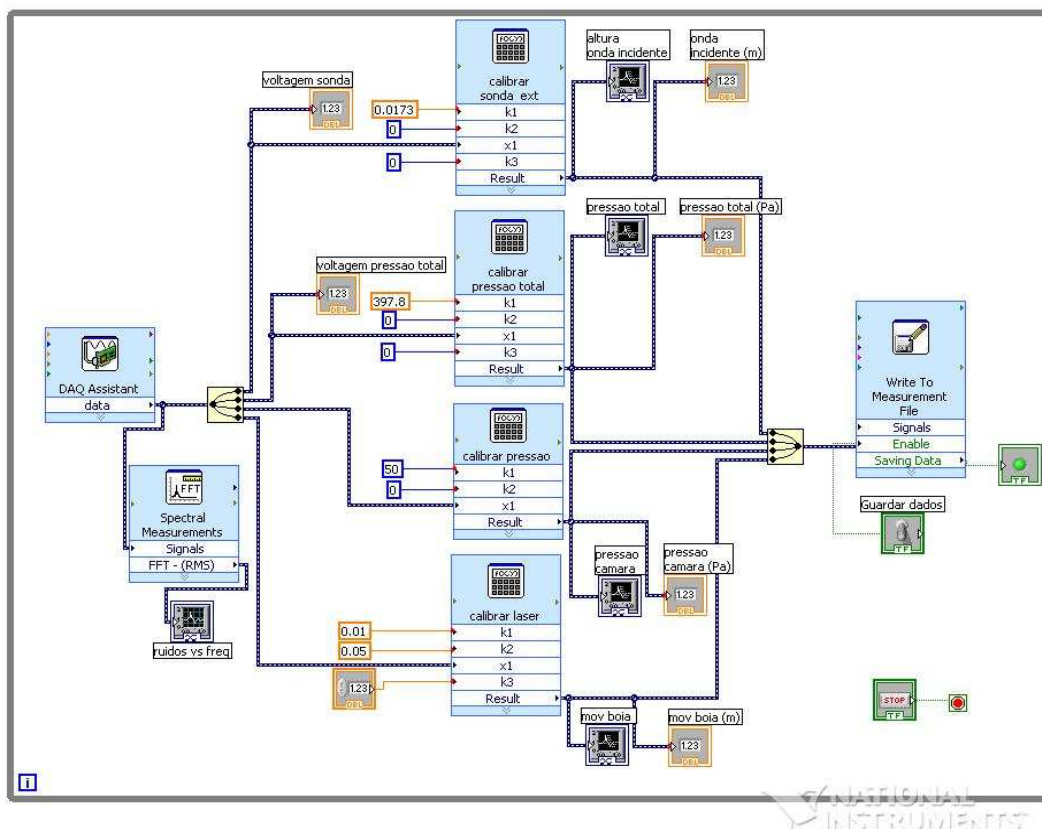
Figura B.2: Diagrama de Blocos do programa em LabView

Na figura B.2 apresenta-se o diagrama de blocos utilizado no programa LabView para a leitura e conversão dos sinais obtidos.

No lado esquerdo tem-se um bloco para a aquisição dos dados e no lado direito um para a escrita dos resultados em ficheiros .txt. À saída do bloco de aquisição tem-se o bloco para a análise de ruído dos sinais.

No centro do diagrama situam-se os blocos de conversão dos sinais de voltagem para as unidades correctas. É nestes blocos que se inserem as características de cada sensor, isto é, os parâmetros de calibração. Cada bloco destes tem posteriormente uma ligação ao bloco de escrita e também aos blocos de apresentação dos gráficos e valores no painel frontal do LabView.